

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Vliv elektrizovaných drah na napájecí soustavu
Influence of Electric Railways on Power Supply System

2009/2010

Ivo Děrgel

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně, uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne

Podpis

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří mi s prací pomohli, jmenovitě pak prof. Ing. Josefu Palečkovi, CSc. za vedení této práce a svým rodičům za stálou podporu během studia.

Abstrakt:

Nepříznivých vlivů, které působí na napájecí soustavu je mnoho. Napájecí soustava se dělí na stejnosměrnou a střídavou, a každá z těchto soustav na ní nepříznivě působí. Obsahem této práce je popsat způsob, jak se dá snížit nebo úplně eliminovat nesymetrie, a jakým způsobem nepříznivě působí na napájecí soustavu.

Měření se provádělo v trakční napájecí stanici Blansko. Naměřené hodnoty byly vyhodnocovány v programu Excel.

Klíčová slova:

Elektrická vozba, nesymetrie napětí, trakční transformátor, transformovna, nepříznivé vlivy

Abstrakt:

Adverse influences acting on the power system is too much. Power system is divided into AC and DC, and each of these systems affects on her. The content of this work is to describe how they can reduce or completely eliminate the asymmetry, and how it affects on the power system.

Measurement was evaluated in traction substation Blansko.

The measured values were evaluated in Excel.

Keyword:

Electric traction, voltage unbalance, traction transformer, transformer station, adverse influence

Seznam použitých zkratk:

TNS

kV – kilovolt

TT – trakční transformovna

FKZ–filtračně–kompenzační

1. ÚVOD:	- 1 -
2. ELEKTRICKÁ VOZBA NA ČESKÝCH DRAHÁCH	- 3 -
2.1. ZÁKLADNÍ POJMY:	- 3 -
2.2. DYNAMIKA ELEKTRICKÉ TRAKCE	- 5 -
2.2.1. Vozidlové odpory:	- 5 -
2.2.2. Traťové odpory:	- 6 -
2.3. DĚLENÍ ELEKTRIZOVANÝCH DRAH:	- 8 -
2.4. STEJNOSMĚRNÁ PROUDOVÁ NAPÁJECÍ SOUSTAVA:	- 8 -
2.5. STŘÍDAVÁ PROUDOVÁ NAPÁJECÍ SOUSTAVA:	- 10 -
2.6. PŘIPOJENÍ ELEKTRICKÝCH DRAH K ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ	- 11 -
2.7. TRAKČNÍ MĚNÍRNY:	- 13 -
2.8. TRAKČNÍ TRANSFORMOVNY	- 15 -
2.9. ZPŮSOBY NAPÁJENÍ TRAKČNÍ SÍTĚ	- 17 -
2.9.1. Jednostranné napájení	- 17 -
2.9.2. Dvoustranné napájení	- 18 -
2.9.3. Čtyřstranné napájení	- 19 -
2.10. DRUHY TROLEJOVÉHO VEDENÍ	- 20 -
3. NESYMETRIE PŘI NAPÁJENÍ 1 – FÁZOVÝCH DRAH	- 24 -
3.1. ŘEŠENÍ NESYMETRICKÝCH SOUSTAV	- 26 -
3.2. VÝPOČET NAPĚŤOVÉ NESYMETRIE PŘI JEDNOFÁZOVÉM ODBĚRU	- 26 -
3.3. VÝPOČET PROUDOVÉ NESYMETRIE PŘI JEDNOFÁZOVÉM ODBĚRU	- 28 -
3.4. TECHNICKÁ OPATŘENÍ KE ZMÍRNĚNÍ NESYMETRIE	- 29 -
3.4.1. Statickými filtry:	- 29 -
3.4.2. Speciální konstrukcí transformátorů:	- 30 -
3.4.3. Napájením trakčního vedení pomocí zapojení „T''	- 33 -
3.4.4. Napájením trakčního vedení pomocí zapojení „V''	- 36 -
4. MĚŘENÍ NA VYBRANÉ TRANSFORMOVNĚ	- 39 -
4.1. VYHODNOCOVANÉ VELIČINY:	- 43 -
4.2. PŘIPOJENÍ MĚŘICÍ APARATURY V TRANSFORMOVNĚ:	- 43 -
4.3. VÝSLEDKY MĚŘENÍ	- 44 -
4.3.1. Průběh napětí všech tří fází:	- 44 -
4.3.2. Průběh proudu:	- 45 -
4.3.3. Součinitel napěťové nesymetrie	- 46 -
4.3.4. Účinník $\cos(\varphi)$	- 47 -
4.3.5. Srovnání podobnosti grafů výkonu a napěťové nesymetrie pomocí korelace	- 48 -

5. ZÁVĚR.....	- 50 -
6. LITERATURA:.....	- 51 -

1. Úvod:

Elektrické dráhy jsou nezbytnou součástí dnešního světa. Využívají se jak při přepravě osob, tak v průmyslové oblasti při přepravě materiálu a podobně.

V České republice se používají dva druhy napájecí proudové soustavy k provozu elektrických drah:

- Stejnosměrná trakční napájecí soustava
- Střídavá trakční napájecí soustava

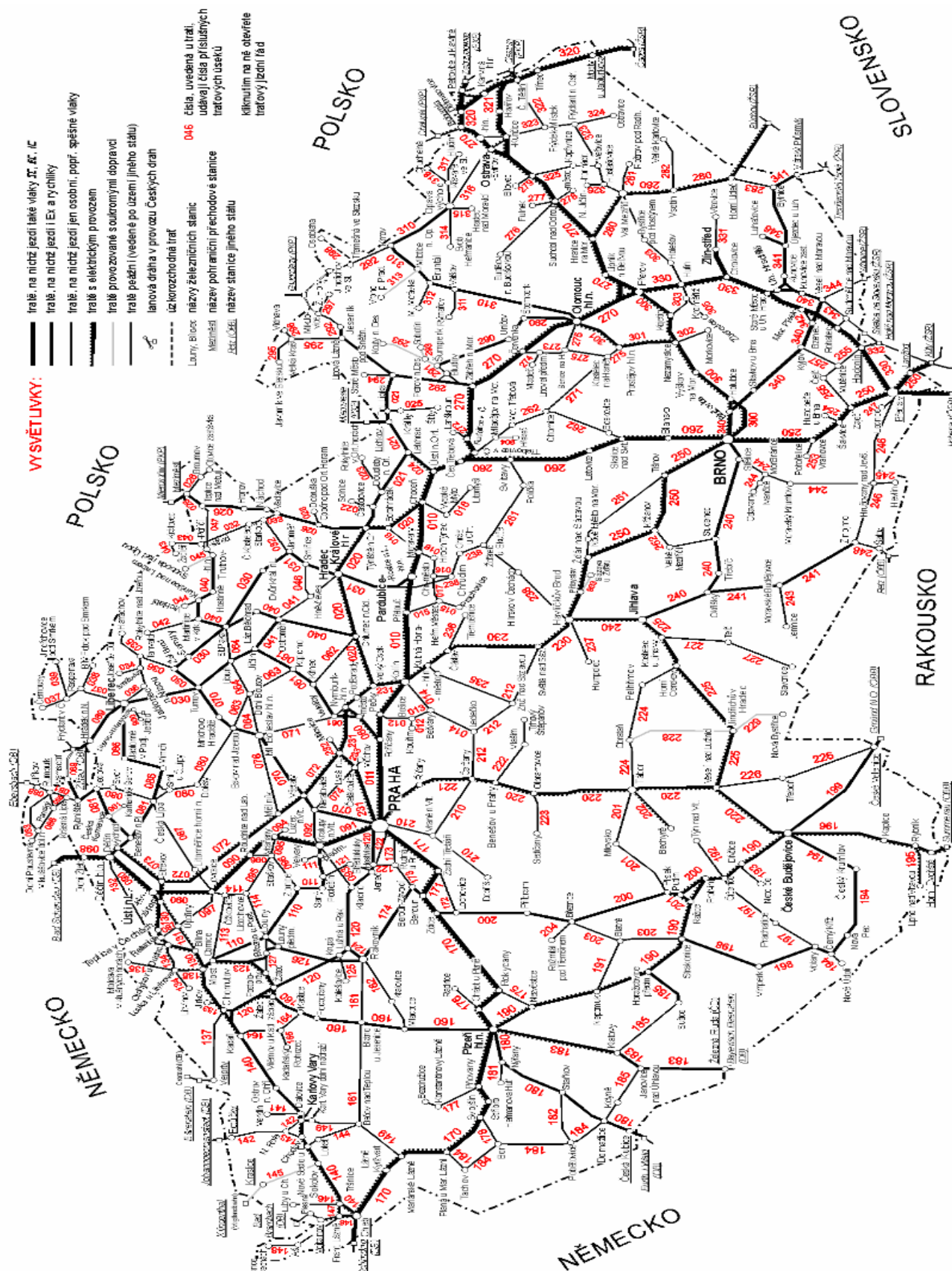
České dráhy provozují a udržují 9513 km tratí (rok 2005), z nichž 1830 km je dvoukolejných, 38 km vícekolejných a 7645 km jednokolejných. 2997 km tratí je elektrifikovaných, z toho 58% stejnosměrným proudem 3000 V a zbytek střídavým proudem 25000 V. Denně vypraví více než 7000 osobních vlaků různých kategorií. Železniční síť v České republice je se svými 2500 stanicemi a zastávkami jednou z nejhustších sítí v Evropě. České dráhy patří dlouhodobě mezi 10 nejvýznamnějších evropských železničních společností.

Některé železniční tratě jsou provozovány soukromými dopravci. Například Jindřichohradecké místní dráhy provozují dvě úzkokolejné tratě u Jindřichova Hradce v délce 79 km se 30 stanicemi a zastávkami.

Společnost Viamont provozuje dvě regionální tratě - z Trutnova do Svobody nad Úpou a ze Sokolova do Kraslic. Železnice Desná v majetku Svazku obcí údolí Desné provozuje trať Šumperk - Kouty nad Desnou s odbočkou do Sobotína. Společnost OKD, Doprava provozuje trať z Milotic nad Opavou do Vrbna pod Pradědem v délce 20,5 km s 10 stanicemi a zastávkami.

V síti Českých drah je téměř 2700 železničních stanic a zastávek.

Železniční mapa České republiky:



Obr. 1 - Železniční mapa České republiky

2. Elektrická vozba na Českých drahách

[1],[5]

2.1. Základní pojmy:

- **elektrická vozba** je provoz vozidel s elektrickou trakcí na elektrizovaných drahách
- **elektrická trakce** je pohon hnacího vozidla elektromotorem

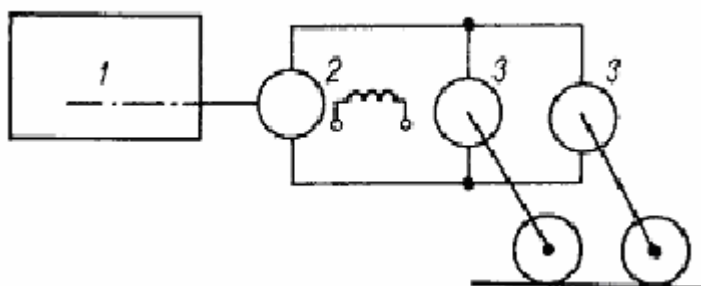
elektromotor, který pohání hnací vozidlo se nazývá elektromotor
dělení vozidel elektrické trakce:

- vozidla, která jsou závislá na přívodu elektrické energie
- vozidla nezávislá na přívodu elektrické energie

U vozidel se závislou trakcí se elektrická energie přivádí z trakčního vedení sběračem, a proto je vozidlo závislé na rozvodu elektrického proudu.

Vozidla, která nejsou závislá na elektrické energii jsou například dieselelektrická vozidla, akumulátorová nebo setrvačnicková vozba.

Dieselelektrické lokomotivy:



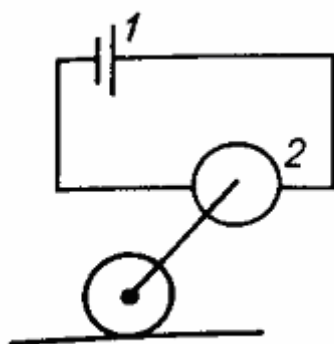
- 1) dieselový motor
- 2) elektrický generátor
- 3) trakční motor

Obr. 2 – schéma dieselelektrické lokomotivy

V České republice se tyto lokomotivy používají hlavně pro posun vagónů, ve velkých průmyslových závodech a nebo pro pohon vlaků na tratích, kde není trolejové vedení.

Slouží také jako záloha pro hlavní elektrizované tratě, kdyby došlo k havárii trolejového nebo příwodního vedení.

Akumulátorové vozby:



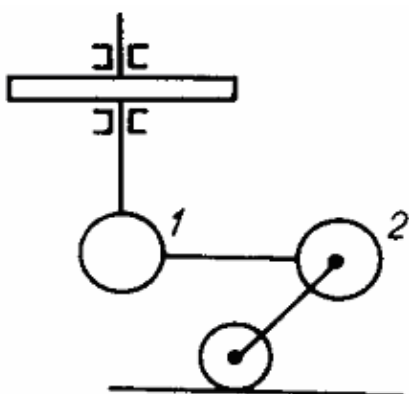
- 1) akumulátorová baterie
- 2) trakční motor

Obr. 3 – schéma akumulátorové vozby

Největší využití těchto lokomotiv je u místní dopravy při přepravě osob. Rychlost přepravy se pohybuje do 60 km/h na vzdálenosti do 500 km.

Dále se akumulátorové lokomotivy používají v dolech, kde je nebezpečí výbuchu.

Setrvačnickové vozby:



- 1) elektrický generátor
- 2) trakční motor

Obr. 4 – schéma setrvačnickové vozby

Setrvačnicková vozba využívá nahromaděnou kinetickou energii v roztočeném setrvačnicku o velké hmotnosti.

Setrvačník se v napájecí stanici roztočí elektromotorem a po odpojení je schopen dodávat mechanickou energii na hnací nápravy přes třecí spojky, nebo pohánět elektrický generátor 1, který dodává elektrickou energii do trakčního motoru.

Setrvačnicková vozba se používá zejména v hlubinných dolech (v nevýbušném provedení), dále v městské hromadné dopravě a v kyvadlové automobilové dopravě (např. mezi přístavem a velkosklady).

2.2. Dynamika elektrické trakce

Trakční odpory jsou odpory, které působí proti pohybu vozidla

Tyto odpory se dělí:

- vozidlové – jízdní odpory, odpor ze setrvačnosti, brzdný odpor
- traťové – odpor ze stoupání, odpor z oblouku, odpor z tunelu

2.2.1. Vozidlové odpory:

Nejdůležitější vozidlové odpory jsou odpory jízdní.

Jízdní odpory jsou závislé na konstrukci vozidla a dělí se:

- odpor valení kol
- odpor ložiskový
- odpor vzduchu

Odpor valení kol:

Ocelové kolo i kolejnice jsou pružná tělesa, a proto vzniká účinkem nápravové síly elastická deformace. Kolo se chová při valení jako by vjíždělo z propadu, které se vytvoří touto deformací.

Odpor valení klesá s rostoucím průměrem kol.

Odpor ložiskový:

Je vyvolán odporem ložisek dvojkolí. Kluzná ložiska mají výrazně větší odpor, než ložiska valivá. Další nevýhodou kluzných ložisek je četnost poruch, která je přibližně 10x větší, než u ložisek valivých, proto se výhradně používají u hnacích a osobních vozidel ložiska valivá.

U některých větších stanic jsou na Českých drahách umístěny indikátory horkého chodu ložisek. Pomocí těchto indikátorů lze snadně vyhledat defektní ložisko po příjezdu vlaku do stanice.

Odpor vzduchu:

odpor vzduchu je dán vztahem:

$$O_{vzd} = 0,5 \cdot c_x \cdot \sigma \cdot S \cdot v^2 \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

kde: O_{vzd} = odpor vzduchu (kN)
 S = plocha vozidla kolmá na směr jízdy (m^2)
 c_x = součinitel úměrnosti, závislý na tvaru čela vozidla (-)
 σ = hustota prostředí, závisí na teplotě vzduchu (kg/m^3)
 v = rychlost jízdy (m/s)

Tvar čela prvního vozidla má značný vliv na velikosti odporu vzduchu, proto mají čela vozidel pro velké rychlosti zaoblený tvar a volné prostory pod rámem vozidla jsou opatřeny oblými kryty.

2.2.2. Traťové odpory:

Traťové odpory jsou závislé na konstrukci trati.

Odpor sklonu:

je to složka tíhy vozidla do směru sklonu na nakloněné rovině. Sklon je označován písmenem s a vypočítá se z rovnice:

$$s = \sin \alpha = \frac{h}{l} \quad (2)$$

odpor sklonu je dán vztahem:

$$O_{skl} = Gi \cdot \sin \alpha = Gi \cdot s \quad (3)$$

kde: O_{skl} = odpor sklonu (kN)

Gi = tíha vozidla (kN)

s = sklon (-)

Protože sklon spádu má zápornou hodnotu, potom i odpor sklonu má zápornou hodnotu. Strojvedoucí má hodnotu sklonu a jeho délku uváděnou na sklonovníku.

Odpor oblouku:

Odpor oblouku vzniká třením okolku řídicího kola o hlavu kolejnice a třením jízdní plochy všech kol o hlavu kolejnice v důsledku otáčení podvozku bezpodvozkového vozidla kolem svislé osy při průjezdu obloukem.

Hodnoty součinitele oblouku jsou zjišťovány experimentálně.

Pro normální rozchod používají ČD vztah :

$$O_{obl} = \frac{0,5}{R - 30} \quad \text{kde: } R = \text{poloměr oblouku (m)}$$

$$O_{obl} = \text{součinitel odporu oblouku (-)}$$

Odpor tunelu:

Vzniká vytlačováním sloupce vzduchu před vlakem a nasáváním vzduchu do tunelu za vlakem. Čím má tunel větší průřez, tím je hodnota součinitele odporu tunelu menší (lepší proudění vzduchu)

Pro jednokolejový tunel se používá hodnota $O_{tun} = 0,002$ (-)

Pro dvoukolejový tunel se používá hodnota $O_{tun} = 0,001$ (-)

2.3. Dělení elektrizovaných drah:

Elektrizované dráhy se dělí podle:

- podle jízdní dráhy
- podle přenosu trakční síly
- podle trakční proudové napájecí soustavy: - stejnosměrné
- střídavé

podle jízdní dráhy:

- dráhy s normálním rozchodem 1435 mm
- dráhy s nízkým rozchodem (úzkorozchodové) 600,750,1000 mm
- dráhy s širokým rozchodem (šírokorozchodové) 1520,1600,1650 mm

podle přenosu trakční síly:

- dráhy adhezní
- dráhy ozubnicové
- dráhy nekonvenční

2.4. Stejnosměrná proudová napájecí soustava:

Stejnosměrné dráhy jsou napájeny z trakčních napájecích stanic, které se u těchto soustav nazývají trakční měnírny.

Zde se 3-fázová energetická soustava mění na soustavu stejnosměrnou.

Jmenovitá napětí stejnosměrných soustav:

- $U_n = 250V$ - pro důlní dráhy

- $U_n = 600V$ - povrchová městská hromadná doprava
- $U_n = 750V$ - MHD metro, nové trolejbusy
- $U_n = 1500V$ - závodní doprava, vedlejší dráhy, průmyslové dráhy
- $U_n = 3000V$ - hlavní dráhy

Při jízdě mezi dvěma napájecími stanicemi se v důsledku úbytku napětí na proměnlivém odporu trakčního vedení mění i napětí na sběrači trakčního vozidla.

Tento proměnlivý odpor je závislý na vzdálenosti. Proto je nutná tolerance výšky napájecích napětí, která u stejnosměrných trakčních napájecích soustav jsou + 20 % a

- 33 % jmenovitého napětí.

Takže u nejpoužívanější stejnosměrné soustavy 3 kV je nejvyšší přípustné napětí v troleji 3600 V a nejnižší 2000 V. V těchto mezích musí spolehlivě pracovat všechna elektrická trakční zařízení pro jmenovité napětí 3 kV.

Tato velká tolerance klade vysoké nároky jak na výrobce elektrických trakčních zařízení, tak i na jejich provozovatele.

Velikost úbytku napětí v troleji je závislá na odporu trakčního vedení, na velikosti proudu odebíraného trakčním vozidlem, ale i na počtu vozidel, které se nacházejí v daném napájecím úseku.

Z hlediska investic je nejrozumnější budovat napájecí stanice, pokud je to možno, s co největší vzdáleností. Se vzdáleností ovšem roste odpor vedení a také počet vozidel v úseku. Z tohoto důvodu se pro hlavní tratě s velkými trakčními výkony v jednotkách desítek MW volí soustava 3 kV, aby úbytky napětí a odebírané proudy byly co nejmenší.

Napěťové hladiny 750V a 600V jsou voleny nižší hlavně z důvodu bezpečnosti.

Vzdálenost napájecích stanic pro stejnosměrné trakční proudové soustavy jsou voleny v rozmezí od 15 do 35 km u soustavy 3kV.

Průměrná vzdálenost na Českých drahách je 19 km.

Stejnosměrné dráhy jsou nejstarší, a proto také nejrozšířenější.

Nevýhoda u provozu stejnosměrných drah je elektrochemická koroze kovových úložných zařízení bludnými proudy.

2.5. Střídavá proudová napájecí soustava:

Tato soustava pracuje v České republice s frekvencí elektrizační soustavy 50 Hz .

Napájecí stanice se nazývají transformovny, protože jsou tvořeny transformátorem.

Jmenovitá napětí střídavých soustav:

- $U_n = 15\text{kV}, 20\text{kV}, 25\text{kV}, 50\text{kV}$ při provozované frekvenci 50 Hz
- pro hlavní železniční tratě
- $U_n = 10\text{kV}, 6\text{kV}$ při provozované frekvenci 50 Hz
- pro průmyslové dráhy
- $U_n = 0,4\text{kV}$ při provozované frekvenci 50 Hz
- pro hlubinné doly

U střídavých drah je tolerance jmenovitého napětí $U_n = + 10 \% \div - 20 \%$ což znamená, že u napěťové soustavy 25kV je přípustné nejvyšší napětí v trakčním vedení $27,5\text{kV}$ a nejnižší napětí 19kV , přičemž krátkodobě je povolen pokles až na hodnotu $17,5\text{kV}$.

Rozvoj jednofázových drah průmyslového kmitočtu se datuje od padesátých let, kdy vývoj výkonové elektroniky umožnil konstrukci lokomotiv s diodovými a tyristorovými usměrňovači.

Lokomotivy a motorové vozy mohou být napájeny napětím 25kV , protože jejich stejnosměrné trakční motory jsou napájeny přes lokomotivní transformátor a usměrňovač. Díky tomu jsou proudy odebírané z trolejového vedení menší, což umožňuje použití lehčích trakčních vedení a větší vzdálenosti trakčních transformoven a to od 40 do 50 km u soustavy 25kV .

Průměrná vzdálenost na Českých drahách je 42 km.

Nevýhoda u provozu střídavých drah je velká cena a složitost hnacích vozidel oproti stejnosměrným drahám.

Další nevýhodou a zároveň velkým problémem u těchto drah je vliv na napájecí soustavu. Způsobují nesymetrii, mají špatný účinník, který je zapotřebí kompenzovat a generují do elektrizační soustavy vyšší harmonické proudy.

2.6. Připojení elektrických drah k elektrizační soustavě

Elektrizační soustava zajišťuje přenos elektrické energie z elektráren ke spotřebitelům. Po transformaci na nižší napětí v transformovnách se energie rozvádí distribučními sítěmi do míst spotřeby v dané oblasti.

Schéma části elektrizační soustavy je znázorněno na obrázku č. 5

TT – trakční transformovna

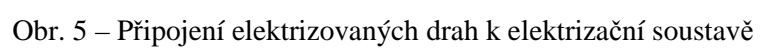
TM – trakční měčírna

Z obrázku jde vidět, že trakční transformovny pro napájení proudové soustavy 25 kV, 50 Hz jsou připojeny na rozvod 110 kV.

Trakční měčírny pro napájení elektrických drah stejnosměrné trakční proudové soustavy 3 kV jsou napájeny vedením 22 kV.

V některých případech, kde není v blízkosti měčírny transformovna 110/22 kV, se elektrická energie do měčírny přivádí vedením 110 kV, a dále se potom transformuje na napětí 22 kV v areálu měčírny. Tímto způsobem se snižují elektrické ztráty v přívodním vedení.

Připojení trakčních měčírén k energetické síti nemá za následek žádné podstatné problémy, ale připojení trakčních transformoven nepříznivě ovlivňuje energetickou soustavu jak vznikem proudové a napěťové nesymetrie, tak zhoršením účinníku a přenosem vyšších harmonických z trakční soustavy.



2.7. Trakční měnírny:

Nejrozšířenější soustavou pro hlavní železniční dráhy v celosvětovém měřítku je stejnosměrná soustava napětí 3 kV. Tímto způsobem je elektrifikováno více než 30 000 km tratí, na kterých jezdí přibližně 8 000 lokomotiv a 2 500 motorových vozidel pro univerzální provoz.

Tyto tratě jsou napájeny z trojfázové sítě pomocí měníren s polovodičovými usměrňovači. V minulosti používané rtuťové usměrňovače byly nahrazeny výkonnými polovodičovými usměrňovacími jednotkami o výkonu 5 až 10 MW.

Na ČD je pro napájení stejnosměrné soustavy použit rozvod 110/22/3 kV.

Měnírny s přímou transformací využívají jednoduchou transformaci ze 110 kV na 3 kV. Obvody vlastní spotřeby nn se připojují na terciární vinutí.

Měnírny s dvojitou transformací mají napěťový mezistupeň 22 kV. Tento způsob provozu je finančně nákladnější, ale provozně spolehlivější. Vlastní spotřeba se zajišťuje transformátory s převodem 22/0,4 kV.

Každá měnírna má dvě hlavní části:

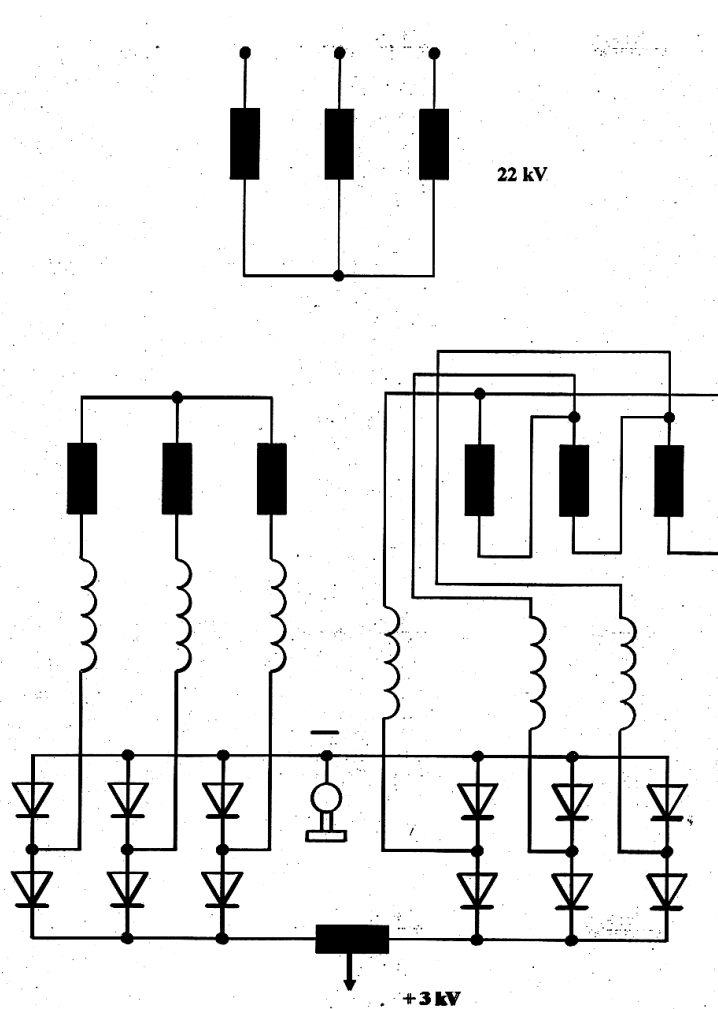
- střídavá část
- stejnosměrná část

Střídavou část tvoří přívodní vedení, rozvodna 110 kV, transformátor 110/22 kV a rozvodna 22 kV.

Stejnosiměrná část obsahuje usměrňovací jednotky a stejnosměrný rozváděč s příslušenstvím.

V případě havárie ve stabilních měnírnách se používají pojízdné měnírny.

Na obrázku 6 je schéma dvanáctipulzního trakčního usměrňovače s nulovou tlumivkou:



Obr. 6 - Dvanáctipulzní trakční usměrňovač s nulovou tlumivkou

2.8. Trakční transformovny

Trakční transformovny spojují elektrizační soustavu s jednofázovou trakční soustavou při zachování frekvence.

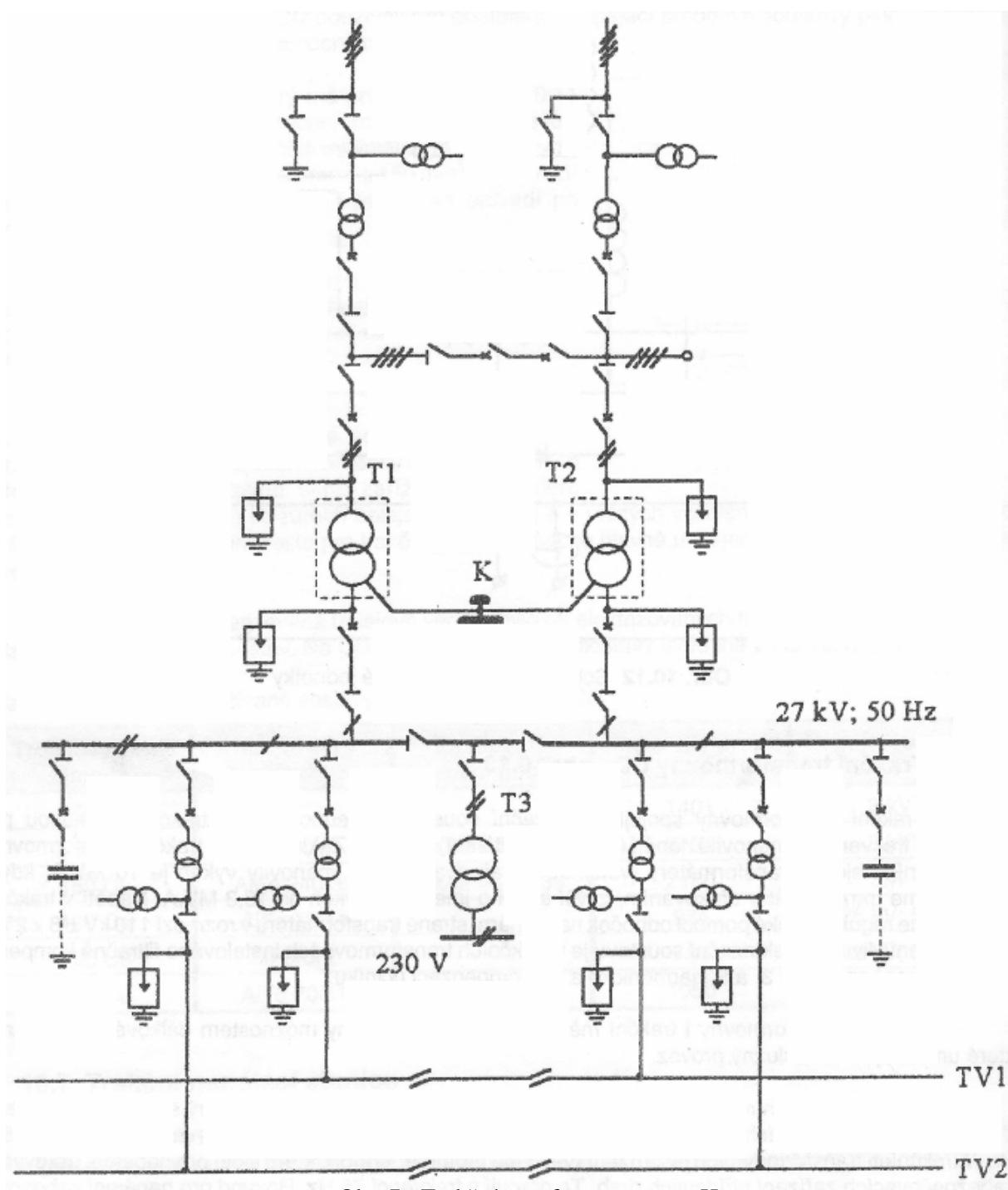
Jmenovité napětí je 27 kV při plném zatížení. Základní částí trakční transformovny jsou trakční, olejové transformátory. Často se používají 2. Jejich jmenovitý výkon je 10MVA a při ochlazování až 13,3 MVA.

Napájecí stanice jsou zásobovány přímo z trojfázového rozvodu vvn. Trať musí být rozdělena na přibližně stejně zatížené úseky. Klade se důraz na rovnoměrné zatížení jednotlivých fází trojfázového rozvodu. Nesouměrnost nesmí být větší než 20 % základního trojfázového zatížení. Moderní stanice mají být co nejjednodušší. Používají se jednofázové trakční transformátory.

Trakční transformovny i trakční měnírny jsou přizpůsobeny možnostem dálkového ovládání z dispečinku, které umožňuje bezobslužný provoz.

Pro omezení vlivu na elektrizační soustavu se používají v trakčních transformovnách filtračně kompenzační zařízení, které filtruje třetí a pátou harmonickou a slouží ke kompenzaci účinníku.

Schéma trakční transformovny typu H:



Obr. 7 - Trakční transformovna typu H

T1, T2 – trakční transformátory, T3 – transformátor vlastní spotřeby, K – kolej, TV – trakční vedení

2.9. Způsoby napájení trakční sítě

Trakční síť je napájena trakčním proudem z trakčních napájecích stanic. Trakční síť se dělí na napájecí úseky za účelem omezení velikostí lokalizace poruch a k omezení velikostí napájecích proudů. Tyto napájecí úseky jsou od sebe izolovány a napájeny odděleně.

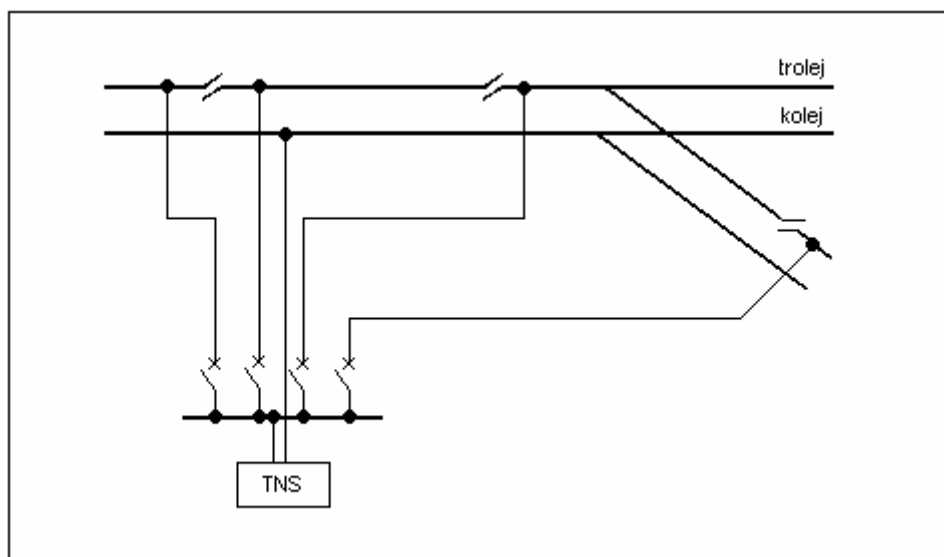
Podle způsobu napájení jednotlivých napájecích úseků rozeznáváme tyto způsoby napájení:

- Jednostranné napájení
- Dvoustranné napájení
- Dvoustranně rozložené napájení dvoukolejné tratě
- Čtyřstranné napájení dvoukolejné tratě se spínacími stanicemi

2.9.1. Jednostranné napájení

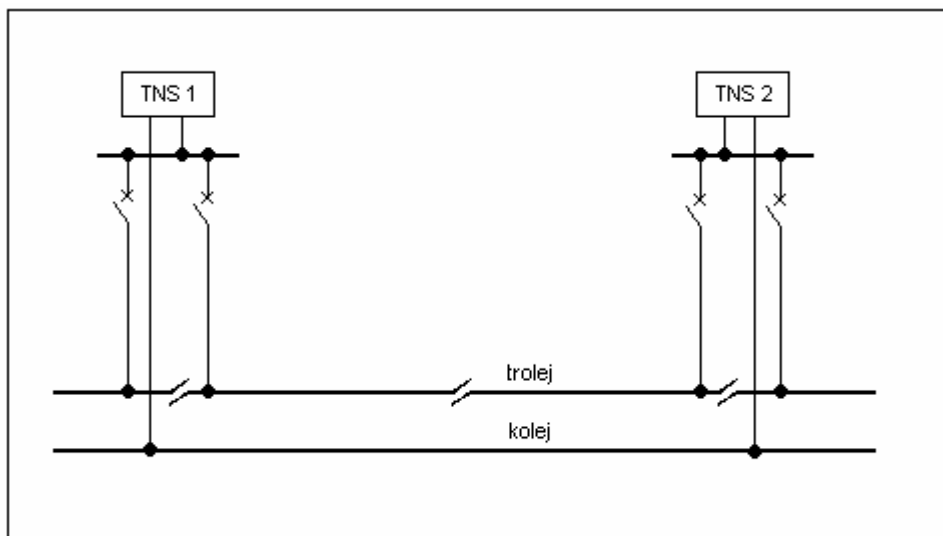
Tento druh napájení se používá velmi často u městských drah. Buďto se provádí jako soustředěné napájení, to znamená, že z jedné napájecí stanice je proud přiváděn kabely do několika napájecích úseků, nebo jako rozložené napájení, kdy napájecí stanice napájí jen dva sousední úseky. Tímto způsobem jsou elektrizovány prakticky všechny střídavé tratě ČD.

Na obrázku 8 je zobrazeno jednostranné napájení soustředěné:



Obr. 8 - Jednostranné, soustředěné napájení

Na obrázku 9 je zobrazeno jednostranné napájení rozložené:



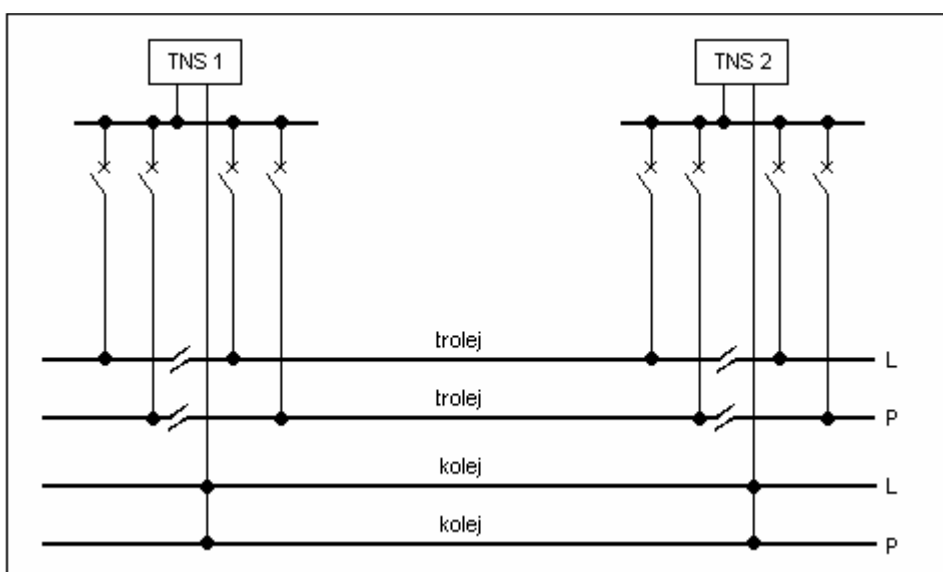
Obr. 9 - Jednostranné, rozložené napájení

2.9.2. Dvoustranné napájení

Dvoustranné napájení znamená napájení levé a pravé koleje odděleně.

Výhodou tohoto napájení je možnost provést výluku napájení jedné koleje při opravách, poruchách, a také pro snadnější lokalizaci poruch.

Na obrázku 10 je zobrazeno dvoustranné rozložené napájení dvoukolejné tratě:



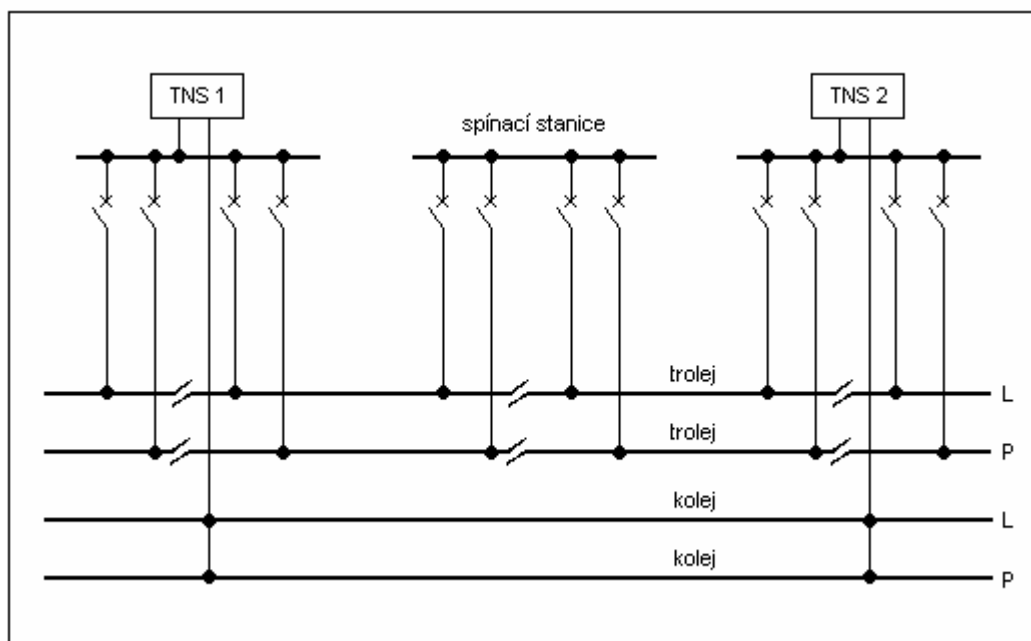
Obr. 10 - Rozložené napájení dvoukolejné tratě

2.9.3. Čtyřstranné napájení

Toto napájení je možno provést na dvojkolejně trati s dvoustranně napájecími úseky tak, že se uprostřed úseku umístí spínací stanice a úsekový dělič. Spínací stanice umožňuje vzájemné propojení všech částí trolejového vedení v úseku. To znamená, že ke každému odběru teče proud čtyřmi cestami. Tímto způsobem se zvětší vodivý průřez a sníží úbytek napětí.

Výhodou tohoto napájení je možnost vyřadit z provozu jen vedení na jedné polovině délky úseku a na jedné koleji při poruše. U silně zatížených tratí s různě proudově zatíženými kolejemi bývá mezi dvěma napájecími stanicemi více spínacích stanic, které mohou být doplněny přídatnými měnícími.

Na obrázku 11 je zobrazeno čtyřstranné napájení dvoukolejné tratě se spínacími stanicemi:



Obr. 11 - Čtyřstranné napájení dvoukolejné tratě se spínacími stanicemi

2.10. Druhy trolejového vedení

Úloha trolejového vedení je zajistit nepřetržitou dodávku elektrické energie do sběrače vozidla. Trolejové vedení musí být navrženo a vyhotoveno tak, aby nedocházelo k odskokům a kmitání sběrače. Díky odskoku vznikne elektrický oblouk, který má za následek opalování trolejového vodiče. Z tohoto důvodu musí být vodič veden vodorovně s určitou horizontální křivostí, aby se plochy sběračů opotřebovávaly rovnoměrně. Tyto vlastnosti musí mít za všech povětrnostních podmínek (při námraze, silném větru i rozdílných teplotách).

Důležitým faktorem pro nároky trakčního vedení je rychlost. Čím je rychlost jízdy vyšší, tím jsou i nároky na trakční vedení vyšší. Při vysokých rychlostech nad $160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ se vyžaduje, aby vedení mělo po celé délce stejnou pružnost, což znamená žádné tvrdé body.

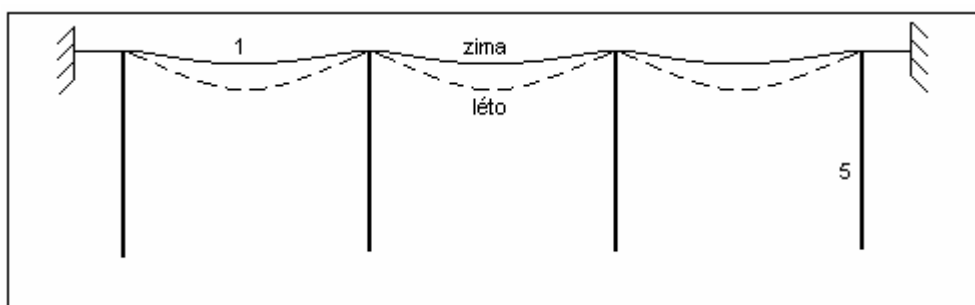
Na základě těchto požadavků a podle rychlosti jízdy se konstruují různé druhy trolejových vedení:

- Vedení prosté
- Vedení řetězovkové nekompenzované
- Vedení řetězovkové polokompenzované
- Vedení řetězovkové plněkompenzované

Vedení prosté:

Toto vedení je bez nosného lana. Trolejový vodič se svou vlastní tíhou zformuje mezi podpěrami do tvaru řetězovky. Vlivem teplot se průhyb vodiče mění. V zimě je průhyb menší a naopak v létě větší. Tento druh trakčního vedení je určen pro malé rychlosti do $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Vzhledem k tvrdým bodům v místě zavěšení a proměnlivé výšce vedení je použití tohoto vedení omezené. Využívá se u městské hromadné dopravy (tramvaje, trolejbusy), nebo k zatrolejování vedlejších staničních kolejí.

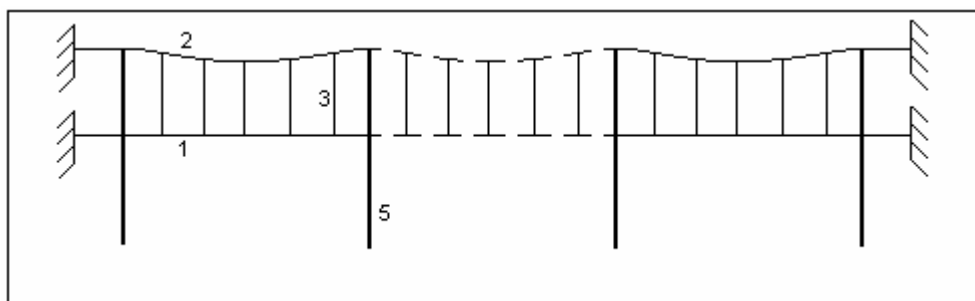


Obr. 12 – Vedení prosté

1 - trolejový vodič 5 - stožár trakčního vedení

Vedení řetězkové nekompenzované:

Toto vedení má nosné lano i trolej pevně ukotvené. Vlivy teplot a průhyb trolejového vodiče je podstatně menší, než u vedení prostého. Tento druh trakčního vedení je určen pro rychlosti do 90 km.h⁻¹.

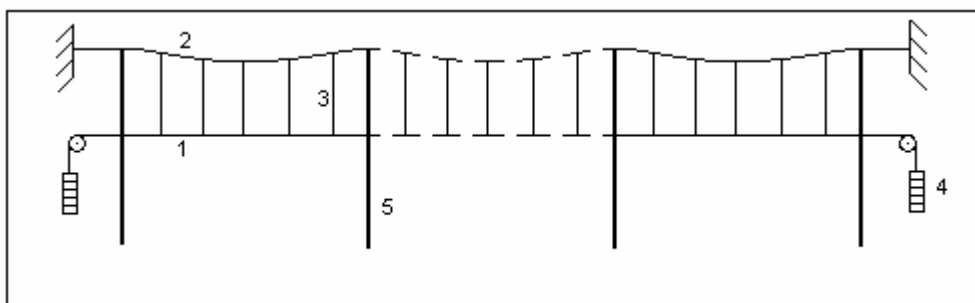


Obr. 13 – Vedení řetězkové nekompenzované

1 - trolejový vodič 2 - nosné lano
3 - věšák 5 - stožár trakčního vedení

Vedení řetězkové polokompensované

Toto vedení má pevně ukotveno nosné lano a trolejový vodič je samočinně napínán závažím, nebo pružinami. Tento druh trakčního vedení je určen pro rychlosti do 120 km.h^{-1} . Používá se zejména v Rusku a na Ukrajině. V České republice se používá jen ojediněle.

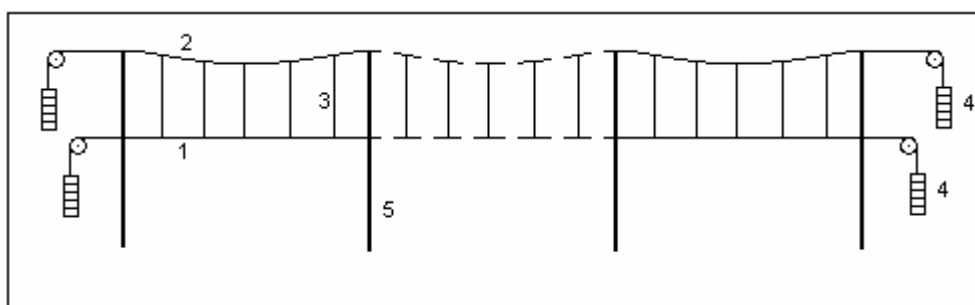


Obr. 14 - Vedení řetězkové polokompensované

- | | | |
|---------------------|-----------------------------|-----------|
| 1 - trolejový vodič | 2 - nosné lano | 3 - věšák |
| 4 - dopínací závaží | 5 - stožár trakčního vedení | |

Vedení řetězkové plněkompensované:

Toto vedení má samočinně napínáno jak nosné lano, tak i trolejový vodič. Tah ve vodičích je při všech teplotách stejný. Tento druh trakčního vedení je určen pro rychlosti do 160 km.h^{-1} . Používá se u Českých drah.

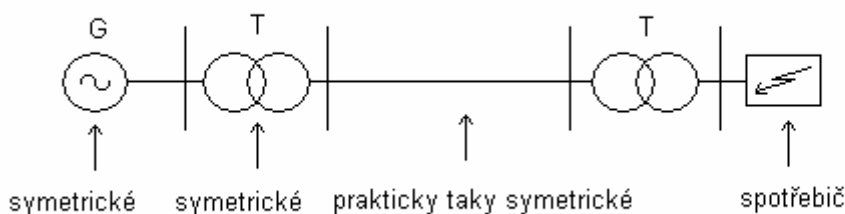


Obr. 15 - Vedení řetězovkové plněkompenzované

- | | | |
|---------------------|-----------------------------|-----------|
| 1 - trolejový vodič | 2 - nosné lano | 3 - věšák |
| 4 - dopínací závaží | 5 - stožár trakčního vedení | |

3. Nesymetrie při napájení 1 – fázových drah

[7],[3]



Obr. 16

Jak generátory, transformátory, tak vedení můžeme prakticky považovat za symetrické, což znamená, že nesymetrii způsobují ve značné míře 1 – fázové spotřebiče.

Nesymetrie se vyskytuje u střídavé napájecí soustavy.

Při provozu vícefázových soustav je nutné udržovat tyto soustavy v symetrickém chodu. Nesymetrie nepříznivě omezuje chod spotřebičů, způsobuje zvyšování ztrát a tím i zvyšuje tepelné namáhání a rychlejší stárnutí elektrotechnických zařízení. Dále nepříznivě ovlivňuje všechny přístroje a stroje energetické soustavy vytvářející magnetické pole, především rotační.

Nesymetrii rozlišujeme na dva typy:

- Amplitudovou
- Úhlovou

Pokud se liší velikosti proudů nebo napětí v jednotlivých fázích, jedná se o nesymetrii amplitudovou, jsou-li různé úhly mezi fázory jednotlivých proudů, nebo napětí, pak se jedná o nesymetrii úhlovou.

Nejčastěji však vzniká nesymetrie obecná, což znamená amplitudová i úhlová současně.

Podle výsledku součtu fázorů jednotlivých fází může být soustava vyvážená (součet fázorů se rovná nule) nebo soustava nevyvážená (součet fázorů je různý od nuly).

Nesymetrie v třífázové elektrizační soustavě jako důsledek připojení jednofázových trakčních odběrů se týká celé soustavy od výroby, přes rozvodný systém, až po ostatní odběratele elektrické energie, kteří jsou na elektrizační soustavu připojeni.

Bezprostředním následkem připojení jednofázové zátěže na třífázovou síť je vznik **proudové a napět'ové nesymetrie**.

- **Proudová nesymetrie** způsobuje vznik vyrovnávacích proudů v tlumícím vinutí synchronních generátorů, zhoršení využití a zvětšení ztrát v transformátorech a vedeních. Proudová nesymetrie spolu s impedancemi přenosové cesty od generátoru k místu jednofázového odběru vytváří napět'ovou nesymetrii.
- **Napět'ová nesymetrie** nepříznivě působí na připojené spotřebiče. Zmenšuje zatížitelnost téměř všech zařízení. Nejnepříznivěji působí na asynchronní motory. Pro běžné hodnoty skluzu je zpětná impedance mnohem menší než sousledná impedance a pro motory různých velikostí dosahuje hodnot 15 – 35% sousledné impedance. Napět'ová nesymetrie 2% způsobí v motoru proudovou nesymetrii 5,7 – 13%. Důsledkem je nerovnoměrné zahřívání jednotlivých vinutí. Přehřátí nepříznivě působí na izolaci a zkrácení životnosti motoru. Napět'ová nesymetrie 4% způsobuje zkrácení životnosti asynchronního motoru na polovinu.

V normálním provozu třífázové soustavy můžeme považovat napětí generátorů za souměrné. Proudů závisí na charakteru odběrů a ve značné míře je ovlivňují velké jednofázové spotřebiče, jako jsou například velké indukční pece nebo jednofázové trakční odběry, které jsou při poruchových stavech (nesouměrné zkraty) hlavním zdrojem proudové nesymetrie. Napět'ová nesymetrie je největší v místě připojení jednofázového spotřebiče a klesá směrem ke zdroji, který považujeme za souměrný. Proudová nesymetrie má stejnou velikost podél celého vedení.

3.1. Řešení nesymetrických soustav

Při řešení nesouměrných soustav nahradíme souměrnou třífázovou soustavu složkovými soustavami, které jsou souměrné. Podstatou tohoto rozložení je, že řešíme jednodušší dílčí soustavy a vypočtené výsledky se principem superpozice složí. Metoda superpozice se používá pouze pro lineární obvody.

Nejčastějším způsobem řešení nesymetrických soustav je pomocí Fortescuovy metody. Je to nejčastější způsob používaný pro řešení nesymetrických soustav v elektroenergetice.

3.2. Výpočet napěťové nesymetrie při jednofázovém odběru

Součinitel napěťové nesymetrie ρ_U je možné pro případ jednofázového odběru přibližně vypočítat ze zjednodušeného vztahu, který se určí takto:

$$\rho_U = \frac{U_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 = \frac{I_{(2)} \cdot Z_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 \quad (4)$$

$Z_{(2)}$ - impedance zpětné složky v místě připojení .

Při jednofázovém odběru platí pro síťové proudy:

$$I_A = I_{AB} \quad , \quad I_B = -I_{AB} \quad , \quad I_C = 0 \quad (5)$$

Při využití Fortescuovy teorie vypočítáme proud zpětné složky:

$$I_{(2)} = (I_A + a^2 I_B + a I_C) / 3 = I_{AB} \cdot (1 - a^2) / 3 \quad (6)$$

jeho absolutní hodnota je pak rovna:

$$I_{(2)} = \frac{1}{3} I_{AB} \left| 1 + \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right| = \frac{I_{AB}}{3} \quad (7)$$

dosazením do rovnice (4) dostaneme vztah:

$$\rho_U = \frac{I_{AB} \cdot Z_{(2)}}{\sqrt{3} \cdot U_{(1)}} \cdot 100 \quad (8)$$

po úpravě vztahu (8) dostaneme:

$$\rho_U = \frac{I_{AB}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_{(1)}}{U_{(1)}} \cdot \frac{Z_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 = I_{AB} \sqrt{3} U_{(1)} \cdot \frac{Z_{(2)}}{3 U_{(1)}^2} \cdot 100 \quad (9)$$

První část vztahu (9) je rovna odebíranému jednofázovému výkonu S_{1f} . Druhou část rovnice (9) můžeme nahradit převrácenou hodnotou třífázového zkratového výkonu S_{k3}'' , který se obecně určí:

$$S_{k3}'' = \frac{3 \cdot c \cdot U_v^2}{Z_k} = \frac{1 \cdot (\sqrt{3} \cdot U_{(1)})^2}{Z_{(2)}} \quad (\text{MVA}) \quad (10)$$

Ve vztahu (10) jsme využili několika zjednodušení pro snadnější a jednodušší výpočet:

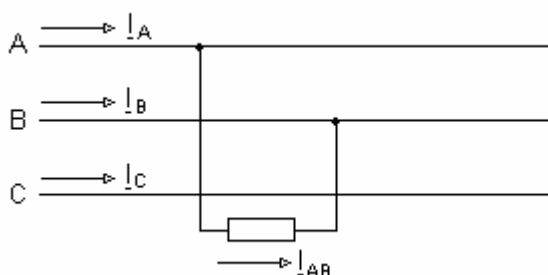
- hodnota koeficientu c se rovná 1
- vztahné napětí U_v se rovná napětí sousledné složky
- pro celkovou impedanci Z_k mezi místem připojení jednofázové zátěže a všemi zdroji v soustavě, ve které převažují turboalternátory, platí $Z_k = Z_{(1)} = Z_{(2)}$

Po využití všech zjednodušení dostaneme ze vztahu (9) přibližný vztah pro součinitel napěťové nesymetrie:

$$\rho_U = \frac{S_{1f}}{S_{k3}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (11)$$

Z tohoto vztahu je možno určit maximální výkon jednofázového odběru, který je možno připojit na třífázovou síť v daném místě při znalosti mezní nesymetrie.

3.3. Výpočet proudové nesymetrie při jednofázovém odběru



Obr. 17

Souslednou složku proudu určíme obdobně jako u zpětné složky proudu dle vztahu (6):

$$I_{(1)} = (I_A + aI_B + a^2I_C) / 3 = I_{AB} \cdot (1 - a) / 3 \quad (12)$$

její absolutní hodnota:

$$I_{(1)} = \frac{1}{3} I_{AB} \left| 1 + \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right| = \frac{I_{AB}}{3} \quad (13)$$

Poté můžeme psát:

$$\rho_I = \frac{I_{(2)}}{I_{(1)}} \cdot 100 = \frac{I_{AB} \cdot \sqrt{3}}{I_{AB} \cdot \sqrt{3}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (14)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že jednofázový spotřebič způsobuje vždy 100% proudovou nesymetrii bez ohledu na velikost odebíraného proudu.

Z tohoto faktu vyplývá, že součinitel proudové nesymetrie ρ_I nemá vypovídací schopnost o charakteru a velikosti jednofázové zátěže, proto se pro posouzení nesymetrie používá součinitel napěťové nesymetrie ρ_U .

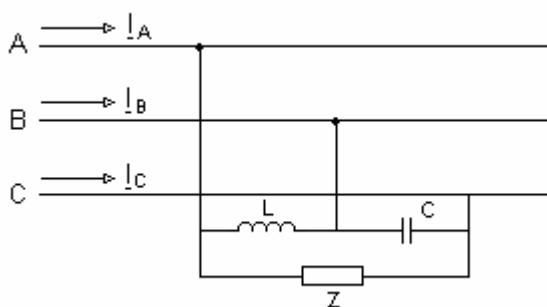
3.4. Technická opatření ke zmírnění nesymetrie

- Statickými filtry
- Speciální konstrukcí transformátorů
- Napájením trakčního vedení pomocí zapojení „T”
- Napájením trakčního vedení pomocí zapojení „V”

3.4.1. Statickými filtry:

Tato metoda snižování nesymetrie se využívá u zátěží, které se nepatrně mění v čase.

Provedení se provádí připojením LC filtrace.



Obr. 18

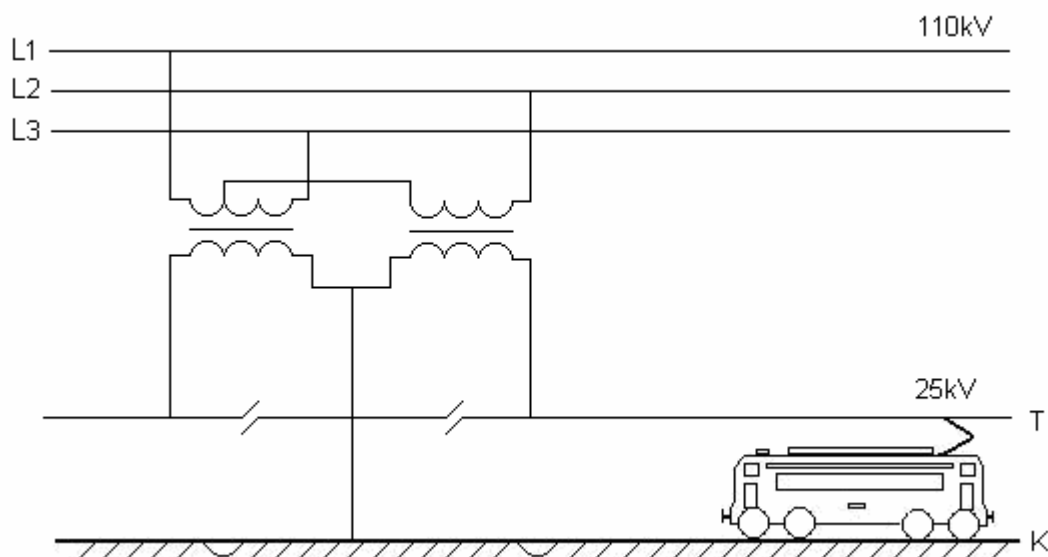
3.4.2. Speciální konstrukcí transformátorů:

Bylo vytvořeno několik speciálních konstrukcí pro snížení, nebo úplné odstranění proudové nesymetrie. Tyto speciální konstrukce se u ČD nepoužívají.

- Scottův transformátor
- Leblancův transformátor
- Transformátor v zapojení Y/D-1, Y/D-11
- Transformátor s nesouměrným sekundárním vynutím

Scottův transformátor:

Nejčastější použití pro eliminaci nesymetrie se využívá Scottův transformátor.



Obr. 19 – Scottův transformátor

Je to provedené spojení dvou jednofázových transformátorů. První transformátor má primární vynutí připojeno na síťové napětí s vyvedeným středem vinutí, který je spojen se začátkem primárního vinutí druhého transformátoru. Konec vinutí druhého transformátoru je připojen

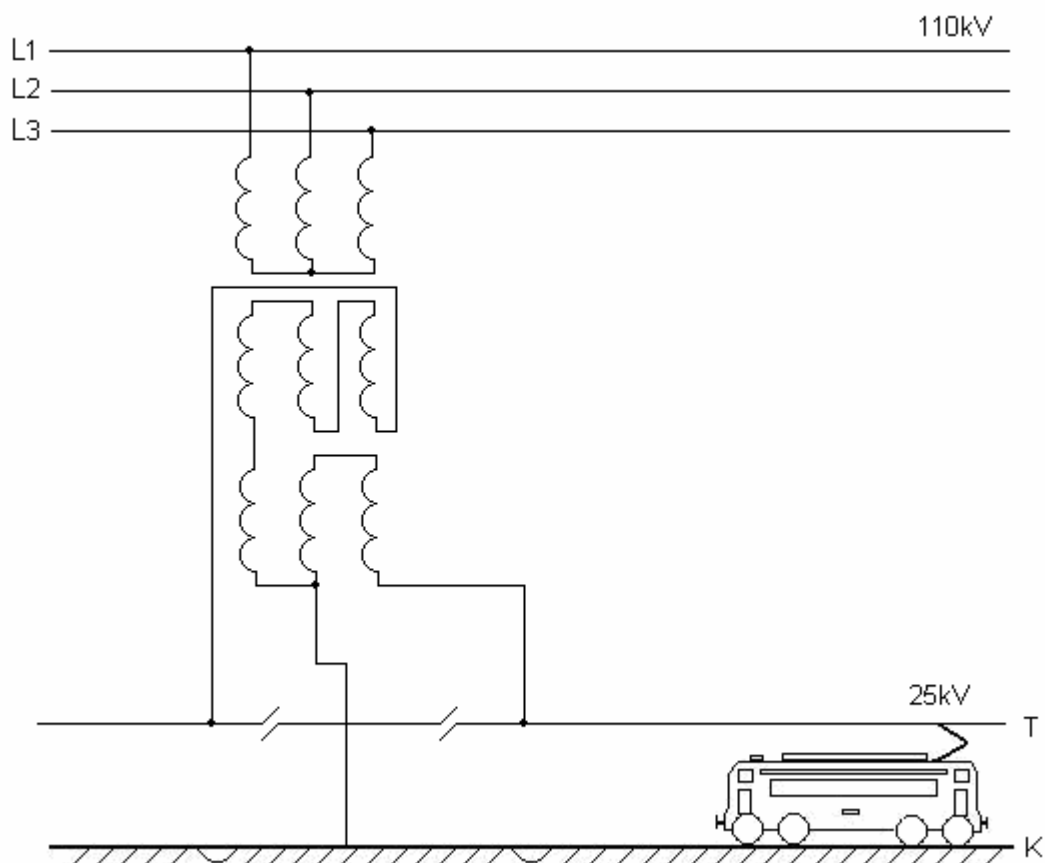
k třetí fázi primárního přívodu. Sekundární napětí napájí odděleně jednu oblast nebo jeden úsek rozvodu trakčního proudu. Mezi oběma fázemi je sdružené dvoufázové napětí.

$$U \cdot \sqrt{2} = 25000 \cdot \sqrt{2} = 35300V = 35,3kV$$

Z tohoto důvodu je nutné rozdělit trolejové vedení neutrálním polem, které zamezuje možnost vzniku zkratu mezi fázemi při průjezdu lokomotivy se zdviženým sběračem v místě styku napájení. Při současně stejném výkonu v obou fázích na straně 25kV se rozděluje součtový výkon dvoufázového systému rovnoměrně do všech tří primárních fází.

Leblancův transformátor:

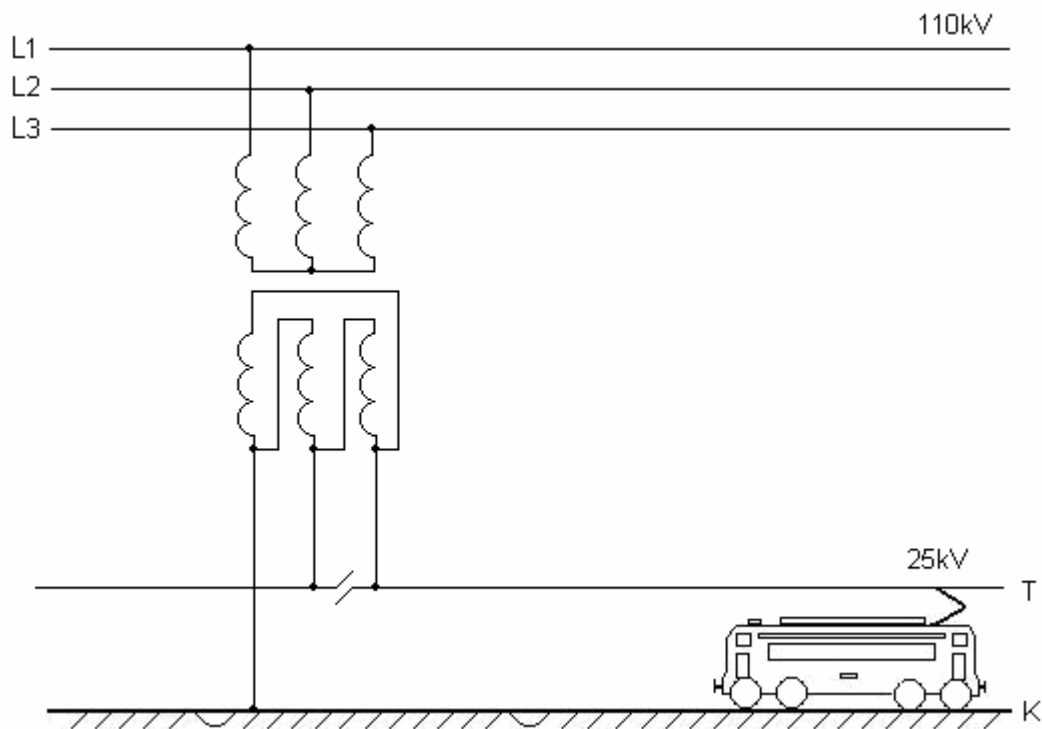
Leblancův transformátor je další z možností snížení nesymetrie.



Obr. 20 – Leblancův transformátor

Transformátor v zapojení Y/D-1, Y/D-11:

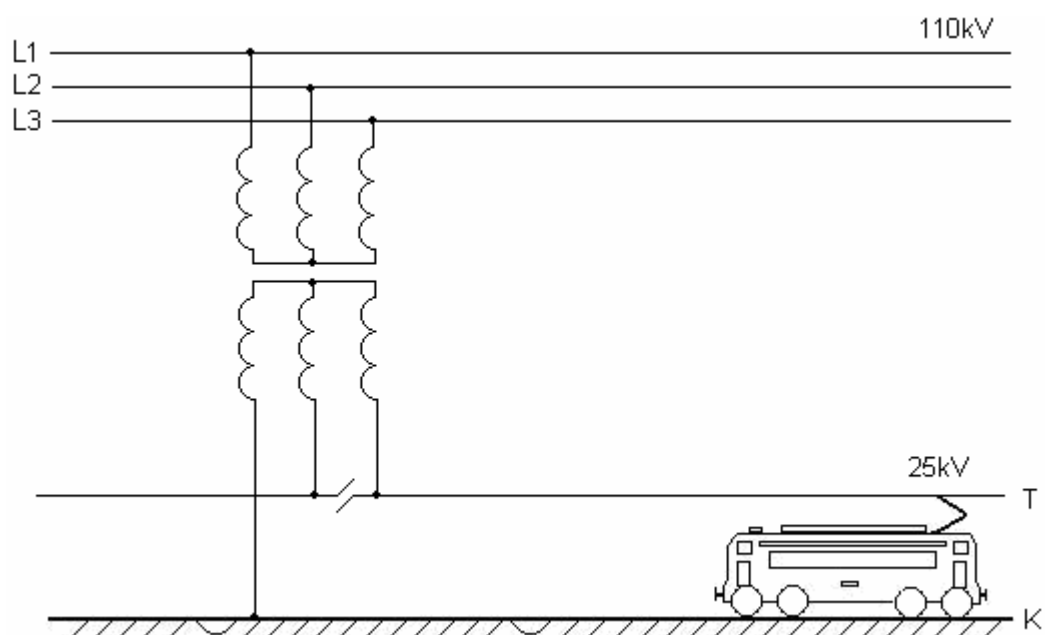
Jedním z dalších alternativ ke snížení nesymetrie pomocí speciálních konstrukcí je zapojení transformátoru Y/D-1, Y/D-11. Schéma je znázorněno na obrázku č.21.



Obr. 21 - Transformátor v zapojení Y/D-1, Y/D-11

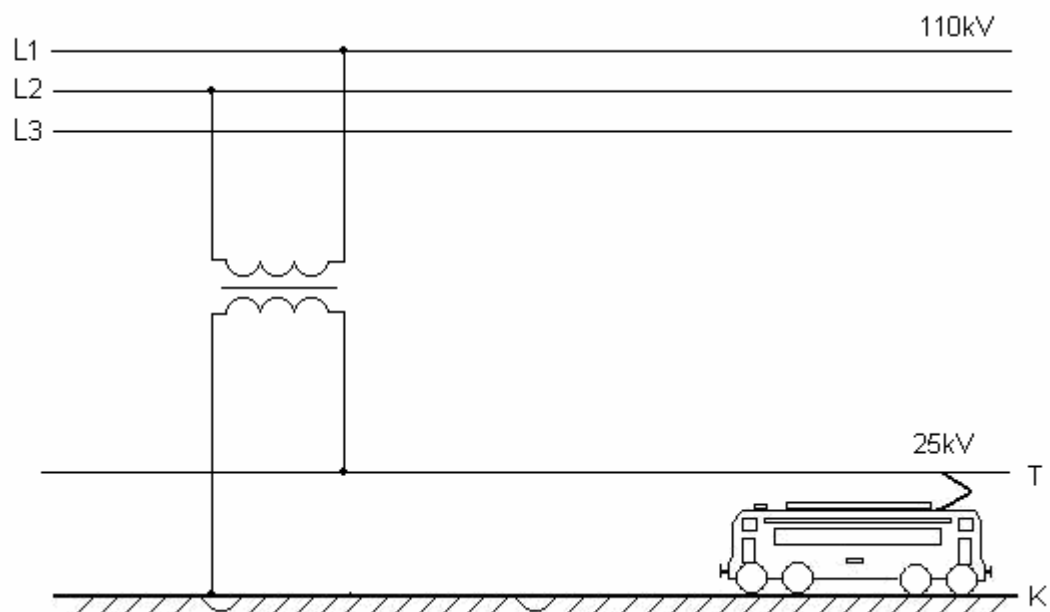
Transformátor s nesouměrným sekundárním vynutím:

Tento transformátor zatěžuje třífázovou síť symetricky při stejné jednofázové zátěži obou částí trolejového vedení.



Obr. 22 - Transformátor s nesouměrným sekundárním vynutím

3.4.3. Napájení trakčního vedení pomocí zapojení „T’’



Obr. 23 – Napájení trakčního vedení pomocí zapojení „T’’

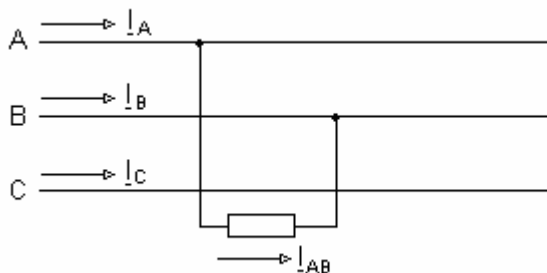
Napájecí stanice s jednofázovým transformátorem je transformovna, ve které primární vynutí jednofázového trakčního transformátoru je připojeno na dvě fáze trojfázové rozvodné sítě. Sekundární vynutí je svým začátkem připojeno na trolejové vedení a konec je připojen na kolejnice. Napájecí stanice napájí úsek trolejového vedení zpravidla o délce kolem 50 km, který je od dalších úseků oddělen pomocí spínacích stanic. Pokud jsou sousední trakční transformovny napájeny ze stejné energetické soustavy, jejich transformátory jsou často zapojeny na jiné dvojce fází energetické sítě, z důvodů zmenšení vlivů nesymetrického zatížení sítě.

Spínací stanice umístěné mezi trakčními transformovnami musí být zřízeny tak, aby nedošlo k podélnému spojení trolejového vedení, pokud jsou v provozu sousední napájecí stanice z důvodu vzniku zkratu. Spínací stanice spínají podélně, a pokud jde o více kolejnou trať i příčně trolejové vedení.

Trolejové vedení je možno příčně spojit pouze při naprosto shodném zapojení sousedních transformátorů. Sousední napájecí stanice pak paralelně spolupracují do trolejového vedení, vzniká oboustranné napájení, což je z hlediska úbytků napětí výhodné. Ve všech ostatních případech se trolejové vedení spíná podélně jen v havarijních stavech.

Tento způsob je nejjednodušší, ale nesymetricky zatěžuje trojfázovou síť. Používá se v případě, kdy lze pro připojení napájecí stanice použít energetickou rozvodnou síť s dostatečným napětím a zkratovým výkonem. Pro napájení jednofázové trakce se hodí napětí od 45 kV výše s přihlédnutím na nesymetrické zatížení sítě. Pro případ poruchy transformátoru je nutno mít rezervní transformátor u každé napájecí stanice, který je při běžném provozu nevyužit.

U Českých drah se podélné spínání neprovozuje, protože u tohoto zapojení je proudová nesymetrie vždy 100%. Tuto skutečnost si ověříme na příkladu výpočtu proudové nesymetrie.

Příklad výpočtu proudové nesymetrie v zapojení „T”:

Obr. 24

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB}$$

$$\underline{I}_B = -\underline{I}_{AB} \quad (15)$$

$$\underline{I}_C = 0$$

$$\rho_I = \left| \frac{\underline{I}_{(2)}}{\underline{I}_{(1)}} \right| \quad (16)$$

Vypočítáme proudy $\underline{I}_{(1)}$ a $\underline{I}_{(2)}$:

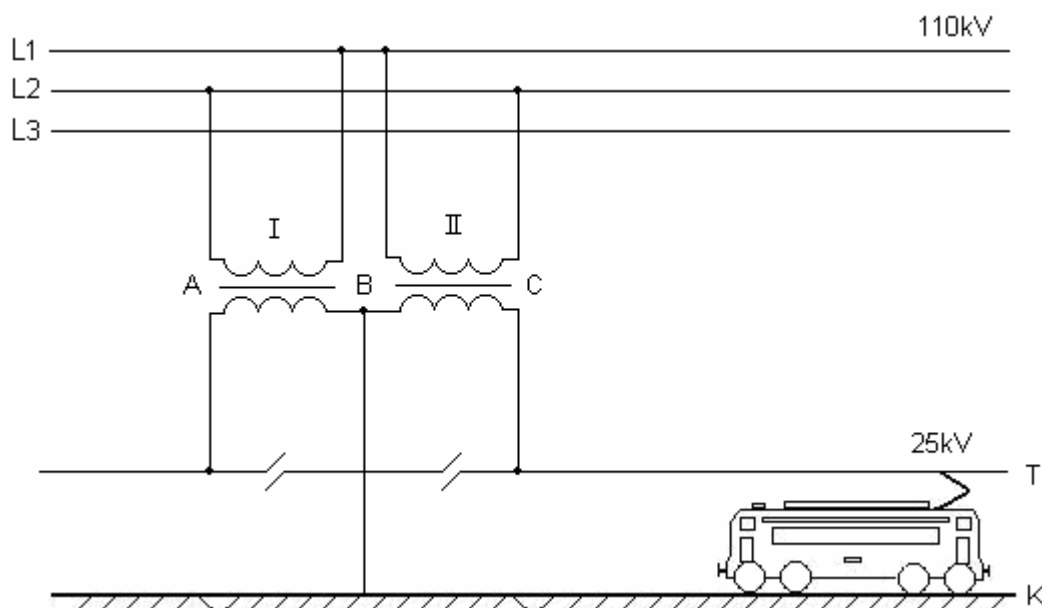
$$\underline{I}_{(1)} = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + a \cdot \underline{I}_B + a^2 \cdot \underline{I}_C) = \frac{1}{3}(\underline{I}_{AB} - a \cdot \underline{I}_{AB}) = \frac{1}{3} \cdot \underline{I}_{AB} \cdot (1 - a) \quad (17)$$

$$\underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + a^2 \cdot \underline{I}_B + a \cdot \underline{I}_C) = \frac{1}{3}(\underline{I}_{AB} - a^2 \cdot \underline{I}_{AB}) = \frac{1}{3} \cdot \underline{I}_{AB} \cdot (1 - a^2) \quad (18)$$

Po dosazení vztahů 17 a 18 do rovnice 16 dostáváme výslednou proudovou nesymetrii:

$$\begin{aligned} \rho_I &= \left| \frac{\underline{I}_{(2)}}{\underline{I}_{(1)}} \right| \cdot 100 = \left| \frac{\frac{1}{3} \cdot \underline{I}_{AB} \cdot (1 - a^2)}{\frac{1}{3} \cdot \underline{I}_{AB} \cdot (1 - a)} \right| \cdot 100 = \left| \frac{(1 - a)(1 + a)}{(1 - a)} \right| \cdot 100 = |1 + a| \cdot 100 = \\ &= \left| 1 + \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right| \cdot 100 = \left| \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right| \cdot 100 = \left(\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{3}{4}} \right) \cdot 100 = 1 \cdot 100 = \underline{\underline{100\%}} \end{aligned} \quad (19)$$

3.4.4. Napájení trakčního vedení pomocí zapojení „V”



Obr. 25 - Napájení trakčního vedení v zapojení „V”

Napájecí stanice s dvěma transformátory, které jsou zapojené do otevřeného trojúhelníku „V” obsahuje vždy dva jednofázové transformátory. Primární vinutí u obou těchto transformátorů je zapojeno na různé dvě fáze trojfázové energetické soustavy tak, aby vznikl otevřený trojúhelník.

Zapojení sekundárního vinutí transformátorů je zapojeno tak, že konec vinutí prvního transformátoru je spojen se začátkem vinutí druhého transformátoru. Toto spojení je dále spojeno s kolejnicovým vedením.

Začátek vinutí prvního transformátoru je připojen na trolejové vedení před napájecí stanicí.

Konec vinutí druhého transformátoru napájí trolejové vedení za napájecí stanicí. Z obrázku 24 je patrné, že vedení je podélně rozpojeno v místě napájecí stanice. Před napájecí stanicí je na vedení jmenovité trakční napětí U_t , které doplňuje otevřený trojúhelník.

Mezi napájecími stanicemi je spínací stanice pro podélné spínání trolejového vedení, a pro více kolejnou trať i spínání příčné. Transformátory v sousedních napájecích stanicích jsou zapojeny shodně (pokud je to možné) tak, že je úsek napájen stejnou fází. Výhodou je

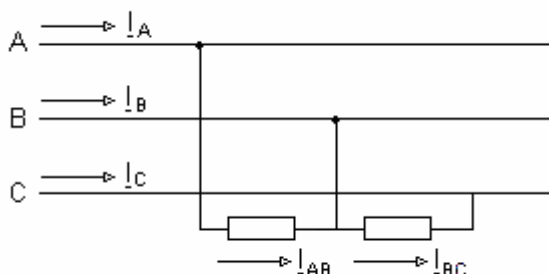
oboustranné napájení trolejového vedení mezi sousedními stanicemi. Poklesne průměrný úbytek napětí v trolejovém vedení, energetické ztráty a tím se zkvalitní napájení.

Pro paralelní spolupráci je zapotřebí splnit následující podmínky:

- oba transformátory musí mít stejný převod
- energetické zatížení sítě ostatními odběry musí být tak nízké, aby se část tohoto zatížení nepřenášela po trolejovém vedení
- oba transformátory musí mít stejné napětí nakrátko
- paralelně spolupracující transformátory musí být napájeny z jedné energetické sítě

Při tomto zapojení se proudová nesymetrie pohybuje v rozmezí mezi 50 – 100 % v závislosti na zatížení před a za napájecí stanicí. Tuto skutečnost si ověříme na příkladu výpočtu proudové nesymetrie.

Příklad výpočtu proudové nesymetrie v zapojení „V”:



Obr. 26

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB}$$

$$\underline{I}_B = -\underline{I}_{AB} + \underline{I}_{BC} \quad (20)$$

$$\underline{I}_C = 0$$

$$\rho_I = \left| \frac{\underline{I}_{(2)}}{\underline{I}_{(1)}} \right| \quad (21)$$

Vypočítáme proudy $\underline{I}_{(1)}$ a $\underline{I}_{(2)}$:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{(1)} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_A + a.\underline{I}_B + a^2.\underline{I}_C) = \frac{1}{3}[\underline{I}_{AB} + a.(\underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}) + a^2.(-\underline{I}_{BC})] = \\ &= \frac{1}{3}[\underline{I}_{AB} \cdot (1 - a) + \underline{I}_{BC} \cdot (a - a^2)]\end{aligned}\quad (22)$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_{(2)} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_A + a^2.\underline{I}_B + a.\underline{I}_C) = \frac{1}{3}[\underline{I}_{AB} + a^2.(\underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}) + a.(-\underline{I}_{BC})] = \\ &= \frac{1}{3}[\underline{I}_{AB} \cdot (1 - a^2) + \underline{I}_{BC} \cdot (a^2 - a)]\end{aligned}\quad (23)$$

Po dosazení vztahů 22 a 23 do rovnice 21 dostáváme výslednou proudovou nesymetrii:

$$\begin{aligned}\rho_I &= \left| \frac{\underline{I}_{(2)}}{\underline{I}_{(1)}} \right| \cdot 100 = \left| \frac{\frac{1}{3}[\underline{I}_{AB} \cdot (1 - a^2) + \underline{I}_{BC} \cdot (a^2 - a)]}{\frac{1}{3}[\underline{I}_{AB} \cdot (1 - a) + \underline{I}_{BC} \cdot (a - a^2)]} \right| \cdot 100 = \left| \frac{\underline{I}_{AB} \cdot (1 - a^2) + \underline{I}_{BC} \cdot a \cdot (a - 1)}{\underline{I}_{AB} \cdot (1 - a) + \underline{I}_{BC} \cdot a \cdot (1 - a)} \right| \cdot 100 = \\ \rho_I &= \left| \frac{(1 - a)[\underline{I}_{AB} \cdot (1 + a) - \underline{I}_{BC} \cdot a]}{(1 - a)[\underline{I}_{AB} + \underline{I}_{BC} \cdot a]} \right| \cdot 100 = \left| \frac{\underline{I}_{AB} \cdot (1 + a) - \underline{I}_{BC} \cdot a}{\underline{I}_{AB} + \underline{I}_{BC} \cdot a} \right| \cdot 100\end{aligned}\quad (24)$$

Ze vztahu (24) vyplývá, že proudová nesymetrie je závislá na zatížení a její hodnota se pohybuje v rozmezí 50 – 100%. V případě stejných zatížení je proudová nesymetrie $\rho_I = 50\%$.

4. Měření na vybrané transformovně

[6],[8]

Napájecí stanice Blansko je situována na trati Brno – Česká Třebová. Jedná se o trakční proudovou soustavu 25 kV, 50 Hz. Je řešena jako transformátorová stanice neboli trakční transformovna 110/27 kV, 50 Hz s jednofázovými napáječi.

Technologické zařízení trakční transformovny je instalováno v novém zděném objektu kromě filtračně kompenzačního zařízení, které je umístěno venku. Rozvodna 110 kV je řešena jako vnitřní a je situována v prvním patře objektu napájecí stanice. Použita je zapouzdrěná rozvodna s izolací SF₆ od firmy ABB. Tvoří ji dvě odbočky na venkovní vedení 110 kV, podélná spojka přípojníc a dvě odbočky na trakční transformátory T101 a T102. Transformátor T101 je připojen na fáze L1 a L3 a transformátor T102 je připojen na fáze L1, L2 trojfázových přípojníc v rozvodně 110 kV.

Trakční transformátory 110/27 kV jsou na straně 110 kV připojeny na sdružené napětí 110 kV. Na sekundární straně 27 kV mají jeden pól připojen přes rozvodnu 27 kV na trolejové vedení, které odpovídá fázi L3, respektive L2 a druhý pól, který odpovídá fázi L1 mají uzemněn a přes zpětné kabelové vedení spojen s kolejnicovým vedením.

Rozvodna 27 kV je situována v samotné hale budovy napájecí stanice. Je řešena jako vnitřní, kobková s dvěma podélně dělenými přípojnícemi.

Vlastní spotřeba napájecí stanice je napájena z transformovny 22/0,4 kV v areálu trakční transformovny trojfázovou přípojkou přes oddělovací transformátor z rozvodu pro zabezpečovací zařízení v železniční stanici Blansko a z jednofázového transformátoru 25/0,22 kV v rozvodně 27 kV. Stejnosměrná část vlastní spotřeby je napájena ze dvou baterií ±110 V a jednou baterií ±24 V.

Oba dva trakční transformátory mají své vlastní filtračně – kompenzační zařízení, která jsou situovány pod přístřešky podél obou stran haly rozvodny 27 kV, což můžeme vidět na obrázku č. 27



Obr. 27 - Filtračně – kompenzační zařízení trakční transformovny Blansko

Filtračně – kompenzační zařízení je tvořeno dvěma filtračními větvemi pro 3. a 5. harmonickou a plynule říditelnou dekompenzační větví s rozsahem $0 - Q_{\max}$.

Filtry jsou navrženy na jmenovitou hodnotu napětí (27 kV) napájecí stanice. Dekompenzační tlumivka a tyristorový regulátor jsou připojené přes jednofázový transformátor 27/5 kV na napětí 5 kV k trakčnímu obvodu.

Dispozičně jsou filtračně – kompenzační zařízení řešena tak, aby v případě potřeby bylo možno nainstalovat i filtry pro 7. harmonickou, což by znamenalo i rekonstrukci filtrů 5. harmonické, protože z energetických důvodů jsou filtračně – kompenzační zařízení navržena na maximální kompenzační výkon 3 MVar při respektování tolerancí kapacit a indukčností.

Ovládání trakční transformovny je možno z řídicích skříní R110 a R27, dálkově z manipulačního rozvaděče v kontrolním stanovišti. V budově lze ovládat jen R110 kV.



Měření se provádělo na trakční transformovně v Blansku dne 20. – 21. ledna 2010.

Na transformovně jsme měřili 3 napětí a 1 proud na straně VVN (110kV) a jedno napětí a jeden proud na trakční straně. K připojení naší měřicí aparatury byly využity měřicí převodníky instalované v transformovně (měřicí transformátory proudu a napětí).

Naše měřicí aparatura byla do obvodu měřicích transformátorů napětí připojena přímo do obvodu měřicích transformátorů proudu pomocí klešťových proudových čidel (bez nutnosti rozpojení obvodu).

K měření na straně 110kV byl použit kalibrovaný analyzátor sítě BK500-ENA330 viz obr. 29.



Obr. 29 - analyzátoru BK-ELCOM v provedení ENA500.xx

K měření na straně 27kV byla použita měřicí aparatura vlastní výroby sestávající z Notebooku, měřicího převodníku USB6210, napětových převodníků LEM a klešťového proudového čidla. Nejistota měření této sestavy byla vyčíslena na 1,5% pro měření napětí a 3,7% pro měření proudu.

Sestava ovšem není zkalibrována, takže výsledky lze považovat pouze za informativní.

Měření probíhalo 25 hodin, od 10 hodin 20.1.2010 do 11 hodin 21.1.2010. Měřicí zařízení byla nastavena tak, aby vyhodnocovala a ukládala 5ti sekundové průměry měřených veličin.

V době od 10:28 hodin do 11:08 bylo vypnuto filtračně kompenzační zařízení (FKZ). Vliv tohoto vypnutí si ukážeme v kapitole 4.3.

4.1. Vyhodnocované veličiny:

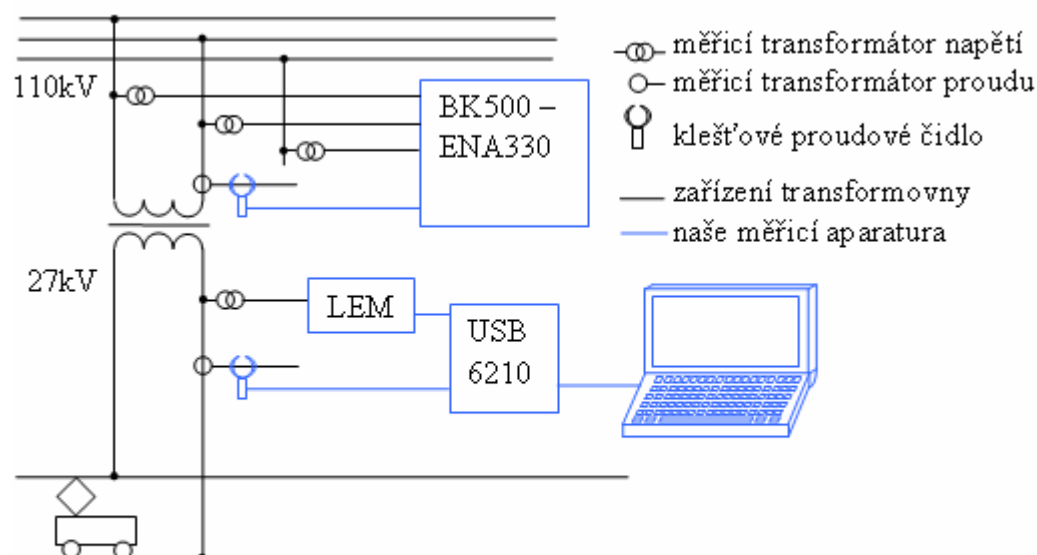
Na straně 110kV:

harmonické složky napětí od 1. do 40. pro všechny 3 fáze, efektivní hodnoty napětí pro všechny tři fáze, harmonické složky proudu od 1. do 40., efektivní hodnota proudu, činný výkon, $\cos(\varphi)$, λ , součinitel napět'ové nesymetrie ρ , činitel harmonického zkreslení THD pro všechny tři napětí a proud.

Na straně 27kV:

harmonické složky napětí a proudu od 1. do 40., efektivní hodnoty napětí a proudu, činný výkon, fázový posuv φ , činitel harmonického zkreslení THD napětí a proudu.

4.2. Připojení měřicí aparatury v transformovně:



Obr. 30 - Principiální náčrtek připojení měřicí aparatury v transformovně

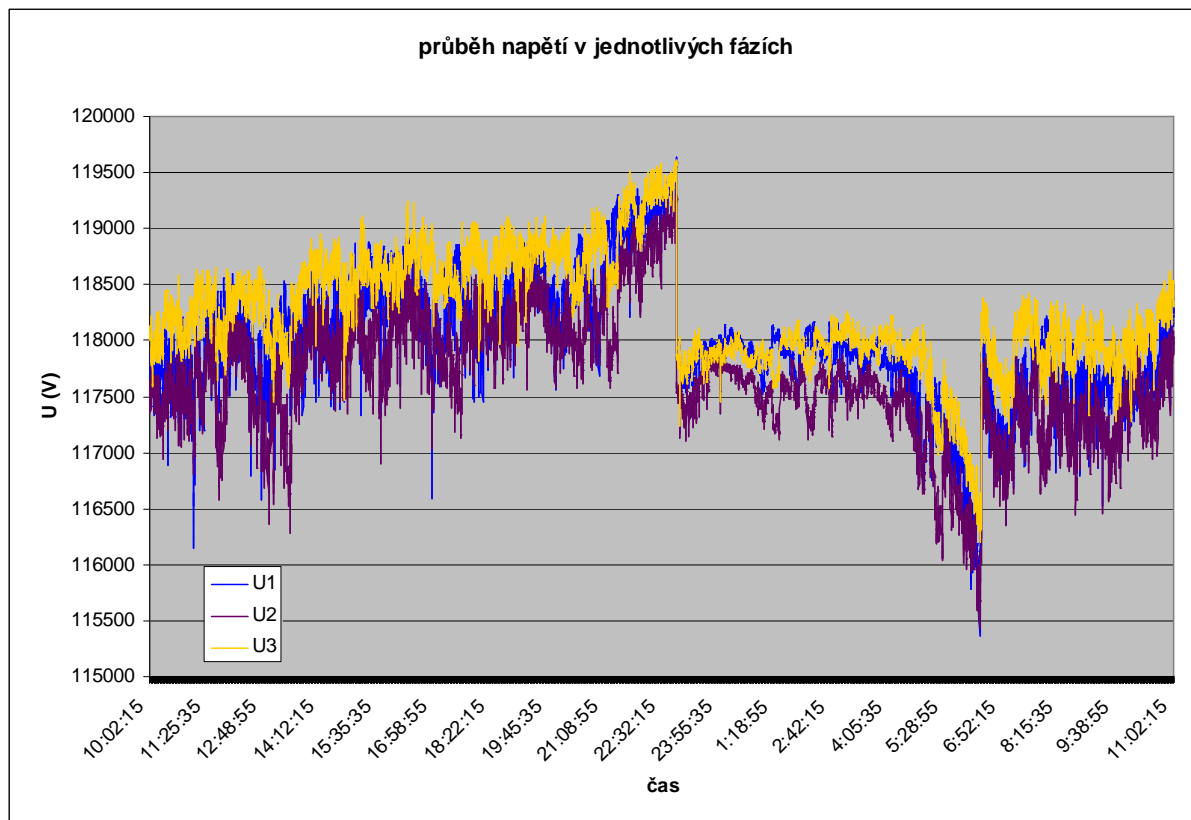
4.3. Výsledky měření

Měření bylo vyhodnocováno v programu Excel 2003, ve kterém byly vygenerovány tyto grafy:

- Průběh napětí všech tří fází za celou dobu měření
- Průběh proudu za celou dobu měření
- Součinitel napěťové nesymetrie
- Účinník $\cos(\varphi)$
- Srovnání podobnosti grafů výkonu a napěťové nesymetrie pomocí korelace

4.3.1. Průběh napětí všech tří fází:

Průběh napětí všech tří fází za celou dobu měření je zobrazen na obrázku č. 31.



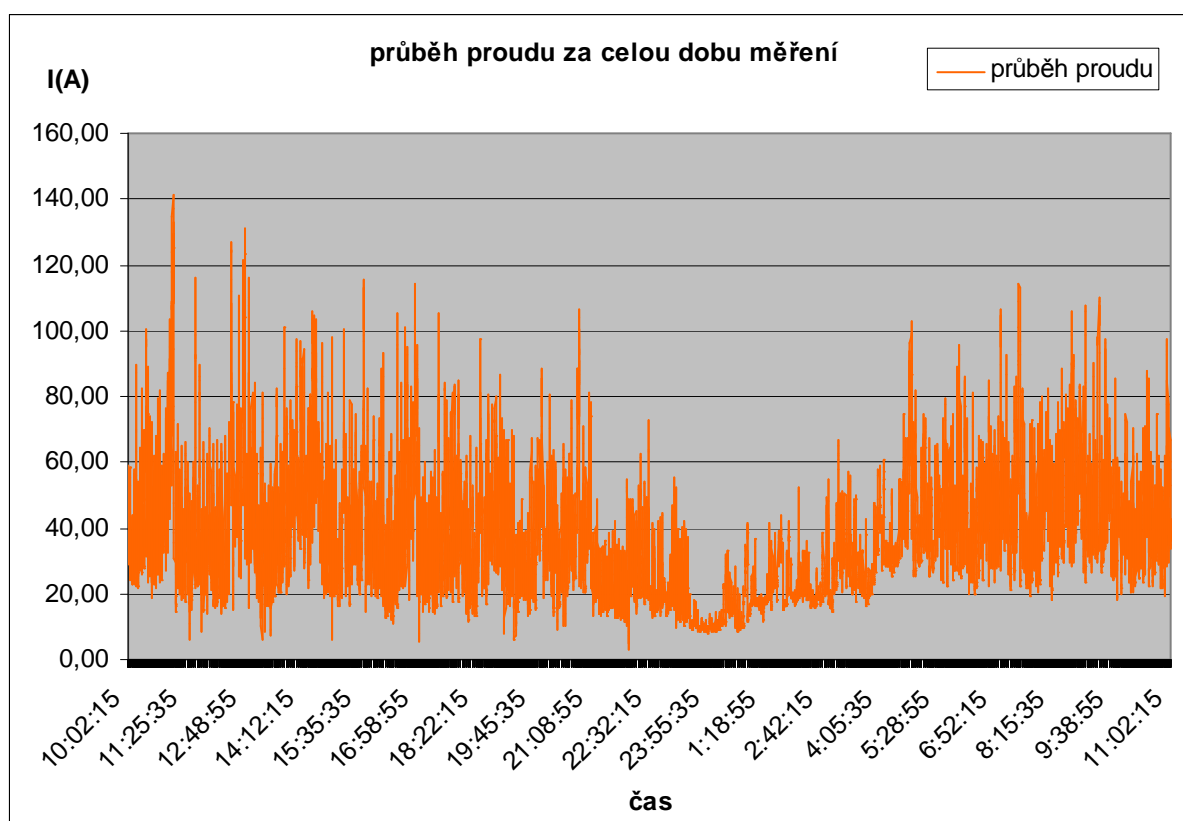
Obr. 31 – Průběh napětí všech tří fází za celou dobu měření

Norma ČSN EN 50160 – charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z distribuční sítě uvádí toleranci napájecího napětí v sítích VN hodnotu $110 \text{ kV} \pm 10\%$. Nejvyšší naměřená hodnota napájecího napětí na primární straně trakčního transformátoru je $119,6 \text{ kV}$ a nejnižší hodnota má velikost $115,36 \text{ kV}$ což zcela odpovídá normě.

Z grafu je patrné, že na napájecí napětí neměla doba vypnutí filtračně kompenzačního zařízení viditelný vliv.

4.3.2. Průběh proudu:

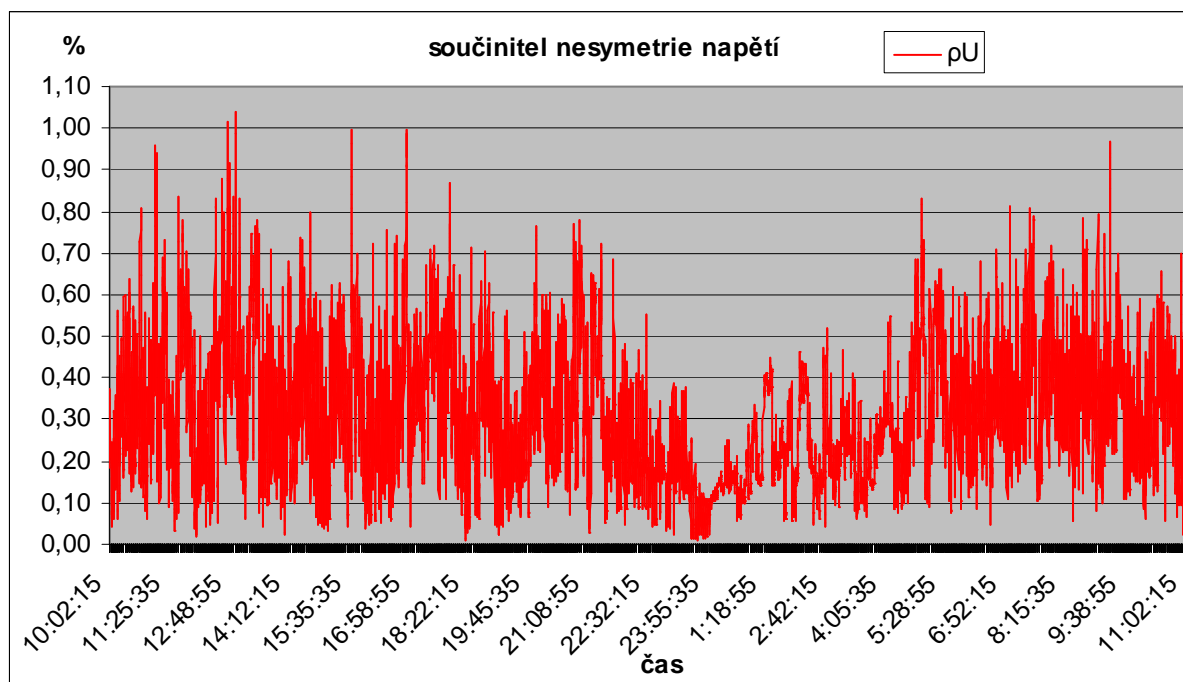
Průběh proudu za celou dobu měření je zobrazen na obrázku č. 32



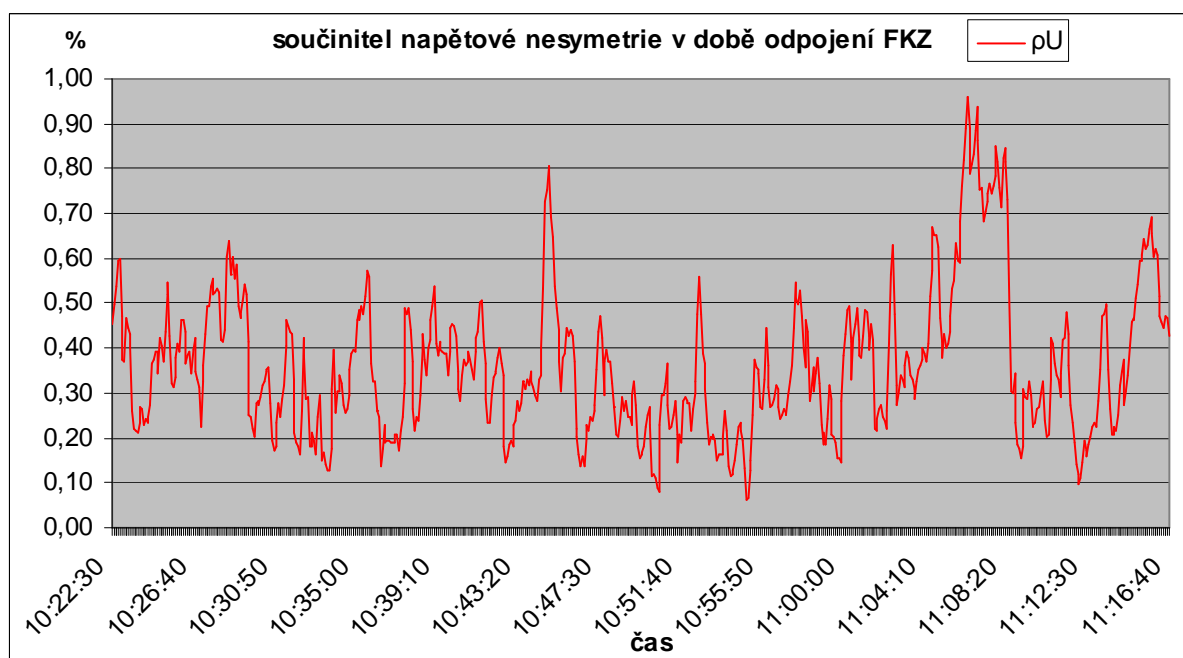
Obr. 32 – Průběh proudu za celou dobu měření

Z grafu lze vyčíst, že vypnutí filtračně – kompenzačního zařízení opět nemá výrazný vliv na průběh odebíraného proudu. Dále je patrné, že v noci od 23:00 do 5:00 je hustota dopravy mnohem menší a velikost odebíraného proudu se pohybuje v rozmezí od 20 do 60 A.

4.3.3. Součinitel napětové nesymetrie



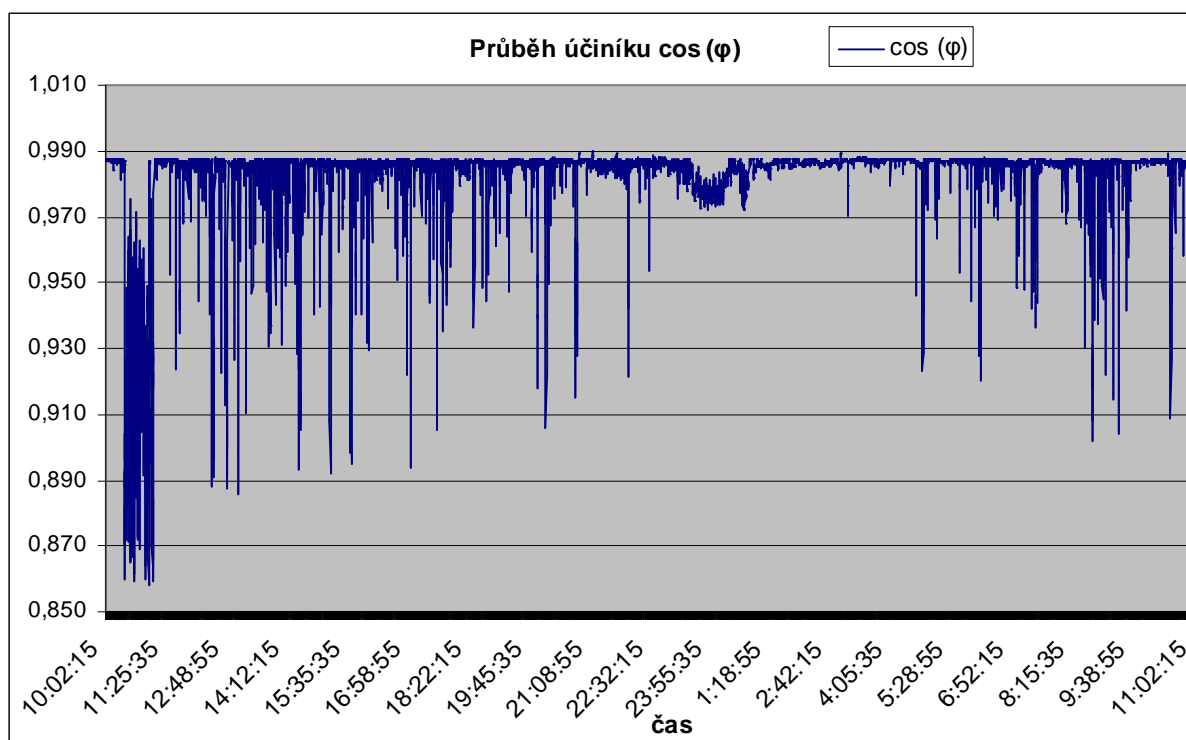
Obr. 33 – Součinitel napětové nesymetrie za celou dobu měření



Obr. 34 – Součinitel napětové nesymetrie za dobu vypnutí FKZ

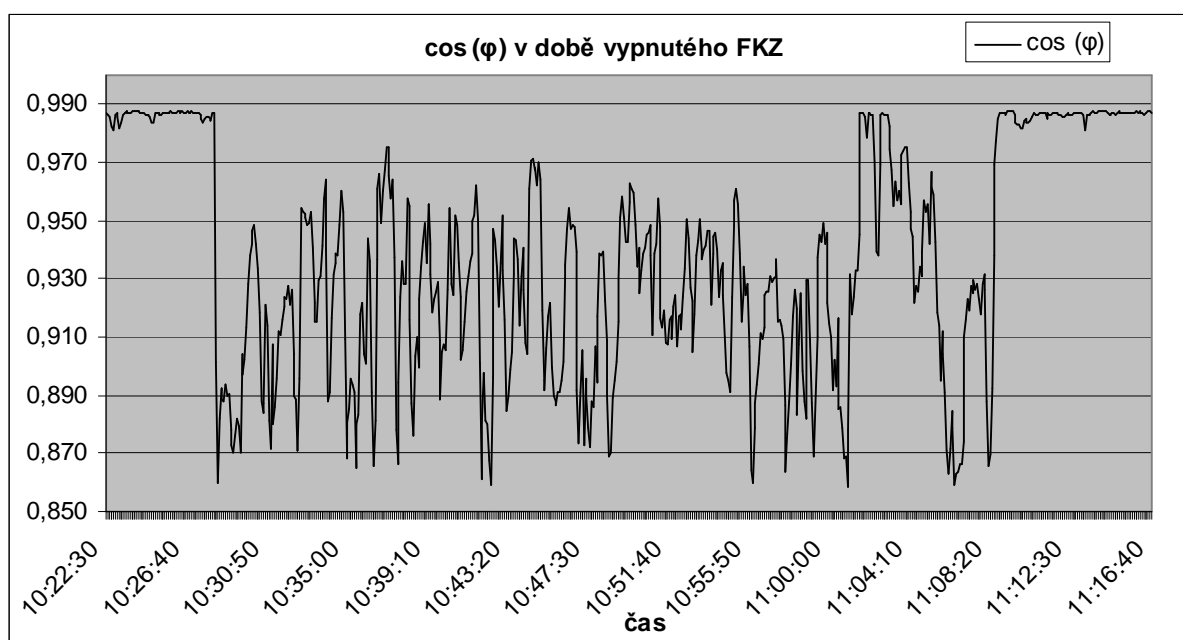
Průběh součinitele napět'ové nesymetrie za celou dobu měření je na obrázku č. 33. Na obrázku č. 34 je zobrazen průběh součinitele napět'ové nesymetrie v době vypnutého FKZ. Opět v době vypnutí FKZ se průběh napět'ové nesymetrie nějak neliší od průběhu napět'ové nesymetrie v době zapnutého KFZ.

4.3.4. Účíník $\cos(\varphi)$

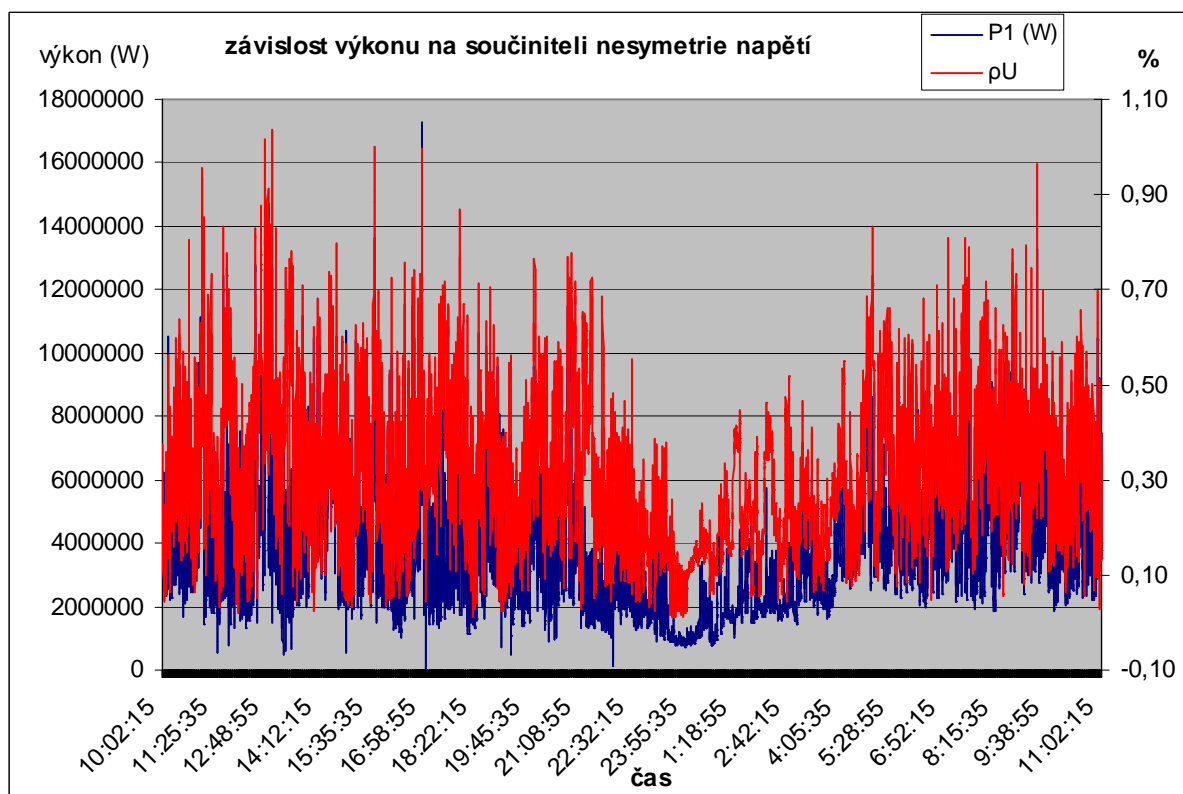


Obr. 35 – Účíník $\cos(\varphi)$ za celkovou dobu měření

Na obrázku č. 35 je průběh účíníku $\cos(\varphi)$. Z grafu je zcela zřejmé, že filtračně kompenzační zařízení výrazně ovlivňuje průběh účíníku. Nejnížší hodnota při zapnutém FKZ se pohybovala přibližně kolem 0,9. V době vypnutého FKZ se nejnížší hodnota dostala na 0,86. Na obrázku č. 36 je detailně znázorněn průběh účíníku při vypnutí FKZ.

Obr. 36 – Účinník cos(φ) za dobu vypnutí FKZ

4.3.5. Srovnání podobnosti grafů výkonu a napěťové nesymetrie pomocí korelace



Obr. 37 - Srovnání podobnosti výkonu a napěťové nesymetrie

Korelace znamená vzájemný vztah mezi dvěma procesy nebo veličinami. Pokud se jedna z nich mění, mění se korelativně i druhá a naopak. Pokud se mezi dvěma procesy ukáže korelace, je pravděpodobné, že na sobě závisejí.

Míru korelace pak vyjadřuje korelační koeficient, který může nabývat hodnot od -1 až po $+1$. Hodnota korelačního koeficientu $+1$ značí zcela přímou závislost mezi křivkami. Pokud je korelační koeficient roven 0 , pak mezi křivkami není žádná statisticky zjistitelná lineární závislost.

Výsledná korelace je vypočtena v programu EXCEL a je znázorněna v tabulce č.1.

Tabulka 1:

	P1 (W)	ρU (%)
P1 (W)	1	
ρU (%)	0,690995	1

Hodnota korelace vyšla po zaokrouhlení $0,691$ z čehož vyplívá téměř 70% podobnost.

5. Závěr

Cílem této práce bylo zjistit, jakým způsobem 1 – fázová elektrická vozba ovlivňuje napájecí soustavu, a jakým způsobem se dá tento nepříznivý vliv snížit, nebo úplně odstranit.

Jedním z hlavních problémů trakční napájecí soustavy 25 kV, 50 Hz je napět'ová nesymetrie. Právě tato soustava je jednou z hlavních příčin vzniku napět'ové nesymetrie trakční napájecí soustavy. Napět'ová nesymetrie roste se vzdáleností, a proto se její hodnota dá snížit zkrácením vzdálenosti mezi napájecími stanicemi. Dalším způsobem snížení napět'ové nesymetrie je pomocí speciálních konstrukcí transformátorů. Také velikost zkratového výkonu rozvodny je důležitým faktorem při snižování velikosti napět'ové nesymetrie. Nesymetrie a její možné odstranění se nachází v kapitole 3.

V poslední části práce je vyhodnoceno měření na trakční transformovně Blansko. Měření začalo dne 20.1.2010 přibližně v 10 hodin a konec měření byl v 11:00 dne 21.1.2010. V době od 10:28 hodin do 11:08 bylo vypnuto filtračně kompenzační zařízení a vliv tohoto vypnutí je znázorněn v grafech v závěru kapitoly 4. Vypnutí FKZ mělo nejvýraznější vliv na účinník

$\cos(\varphi)$. Měřením bylo zjištěno, že nejvyšší hodnota napět'ové nesymetrie za dobu měření byla 1,04 %. Norma ČSN EN 50160 uvádí nejvyšší dovolenou hodnotu napět'ové nesymetrie 2 %. Jelikož nejvyšší naměřená hodnota byla 1,04 %, můžeme konstatovat, že síť v měřeném úseku je velmi kvalitní.

Problematikou nepříznivých vlivů jako je napět'ová nesymetrie, vznik vyšších harmonických nebo vzniku elektrochemické koroze kovových zařízení je třeba se věnovat, protože nepříznivě ovlivňují veškerá elektrická zařízení, která jsou k elektrizační soustavě připojena.

6. Literatura:

- [1] Paleček, J.: Napájení jednofázové vozby Českých drah z hlediska elektromagnetické kompatibility, VŠB-TUO, Ostrava 2000
- [2] Hořínek, P.: Resonance in power supply system of AC traction. In sborník WOFEX 2007, Ostrava:VŠB – TU Ostrava, 2007
- [3] Hlava, K.: Elektromagnetická kompatibilita drážních zařízení, skripta DFJP Pardubice, 2004
- [4] Paleček J., Golier J., Pokorný M.: Elektroenergetika I, Vysoká škola dopravy a spojov, Žilina, 1990
- [5] Müller J., Mobilní prostředky a trakční zařízení I,II díl, VŠB-TUO, Ostrava 1998
- [6] ČSN EN 50160, Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z distribuční sítě
- [7] Kypús J., Nepříznivé vlivy elektrické vozby na napájecí soustavu, VŠB – TUO, Ostrava, 2009
- [8] Materiály napájecí stanice Blansko